ANNALES
DE
L'INSTITUT NATIONAL
DE LA
RECHERCHE AGRONOMIQUE

ANNALES
AGRONOMIQUES

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

Ann. agron., 1961, **12** (1)

NOTE DE LA RÉDACTION

En novembre 1960, une réunion de travail était organisée par la Station centrale de Bioclimatologie, en accord étroit avec le Service de l'Hydraulique du Génie Rural. Y participaient les chercheurs de l'I. N. R. A. et les ingénieurs du Génie Rural intéressés par ces questions, en vue de faire le point des travaux et des recherches en cours. Le présent numéro des *Annales* rassemble les différents documents présentés et discutés au cours de cette réunion.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 5-11

631. 67

LE PROBLÈME DES IRRIGATIONS DE COMPLÉMENT, PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT, INCIDENCE SUR L'AMÉNAGEMENT DES EAUX, NÉCESSITÉ ET OBJECTIFS D'UNE EXPÉRIMENTATION

A. DARLOT
Service technique de l'Hydraulique, Direction générale du Génie Rural, Paris.

I. — PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT DES IRRIGATIONS DE COMPLÉMENT

La superficie actuellement irriguée en France doit être comprise entre 500 000 et 1 000 000 d'ha sans qu'il soit possible de préciser davantage ce chiffre. La dose annuelle moyenne d'irrigation pouvant être évaluée à environ 10 000 m^3/ha en moyenne, soit le double des besoins réels, la consommation annuelle d'eau d'irrigation doit représenter actuellement 5 à 10 milliards de m^3.

Jusqu'à ces dernières années, on considérait que l'usage de l'irrigation était réservé aux régions arides ou sub-arides, c'est-à-dire aux régions à l'intérieur desquelles les déficits d'approvisionnement en eau interdisent toute production agricole intensive. C'est ainsi qu'il était admis qu'en France le développement de l'irrigation concernait essentiellement les zones méridionales caractérisées par des températures élevées et une absence quasi-totale de précipitations estivales ; c'est d'ailleurs dans ces zones que se trouve actuellement localisée la plus grande partie de la superficie irriguée de la France.

Par contre, dans les régions dites « humides », c'est-à-dire celles à l'intérieur desquelles les précipitations moyennes sont suffisantes pour permettre la pratique de diverses cultures à un niveau d'intensification convenable dans des conditions économiques acceptables, l'intérêt de l'irrigation n'avait jusqu'ici semblé nullement évident.

Les efforts entrepris depuis un siècle pour accroître et régulariser les rendements et la qualité des produits obtenus dans ces régions ont essentiellement porté sur l'amélioration des techniques culturales, la sélection des espèces végétales, l'apport de matières fertilisantes et d'amendements, la lutte contre les ennemis des cultures et certaines améliorations foncières comme l'assainissement des terres trop humides. Des progrès peuvent certes être encore accomplis grâce à de nouveaux perfectionnements de ces facteurs de production, mais il est vraisemblable qu'ils se traduiront

dans l'avenir par une amélioration lente des rendements. Le principal facteur d'intensification dont la mise en œuvre doit être envisagée dans les années à venir est *l'irrigation.*

L'intérêt économique des irrigations de complément pourrait apparaître contestable. Pour en juger valablement il convient, à notre sens, d'analyser les avantages qu'il est possible de retirer de ces irrigations sur différents plans.

Tout d'abord, la suppression des déficits d'alimentation en eau doit se traduire par un accroissement sensible des rendements culturaux et du revenu net des exploitations qui correspond aux nécessités d'une inéluctable intensification et qui apparaît impérative en face des accroissements prévisibles de la population non seulement française mais européenne. Actuellement, la superficie agricole utile de la France est de 34 millions d'ha pour une population de 44 000 000 d'habitants. Pour l'ensemble des pays de la C. E. E. elle est de 69 500 000 ha pour 165 000 000 d'habitants. La superficie agricole utile par habitant est donc de 0,77 ha/h pour la France et de 0,42 ha/h pour la C. E. E. (contre 2,3 ha/habitant aux E. U.). Dans l'hypothèse d'une augmentation de la population de la C. E. E. jusqu'à 200 000 000 d'habitants (en 1991 ?), la superficie agricole utile par habitant ne serait plus que de 0,35 ha habitant. La France occupe donc une position privilégiée due non seulement à l'importance de sa superficie agricole utile qui représente 50 p. 100 de la superficie agricole utile de la C. E. E. mais également à ses caractéristiques climatiques et c'est essentiellement l'accroissement de sa production agricole qui devra permettre de faire face aux besoins accrus de l'Europe où la S. A. U. par habitant va décroître progressivement dans l'avenir.

D'autre part, la pratique de l'irrigation en zone humide a pour effet de réduire le prix de revient unitaire des produits récoltés. Il apparaît, en effet, que l'accroissement de profit par hectare croît dans des proportions plus importantes que l'accroissement des rendements. Ainsi, des études effectuées aux États-Unis sur maïs ont mis en évidence une diminution de 24 p. 100 du prix de revient du quintal en culture irriguée.

En deuxième lieu la pratique systématique de l'irrigation est seule susceptible de contribuer efficacement à la régularisation des différentes productions. Certes, la mise en œuvre des facteurs de production précédemment évoqués a permis de réduire sensiblement les variations de rendement de la plupart des cultures, mais il n'en reste pas moins vrai que dans les régions non irriguées ce sont essentiellement les caprices de la pluviométrie qui provoquent une irrégularité de la production. Cette irrégularité a des répercussions considérables aussi bien au niveau des exploitations elles-mêmes qu'au niveau de l'économie nationale. En effet, la plupart des cultivateurs ne disposent pas de réserves financières suffisantes pour éponger les déficits consécutifs à une mauvaise année et se voient contraints dans ce cas à réduire leurs investissements au cours des années suivantes, ce qui a pour effet d'aggraver les conséquences d'une année déficitaire. D'autre part, la commercialisation des produits se fait incontestablement dans de meilleures conditions lorsque le producteur peut connaître à l'avance, avec une marge d'erreur aussi faible que possible, le volume de sa production.

Enfin, il apparaît difficile, sur le plan national, d'orienter valablement la production en fonction des débouchés si l'irrégularité de cette production interdit de formuler des précisions quantitatives à long terme. L'exploitation agricole située en pays

humide se trouve dans une situation comparable à celle d'une exploitation industrielle équipée pour fabriquer une certaine quantité de produits qui ne pourrait savoir en début d'année quel serait le volume de sa production en cours d'année parce que son approvisionnement en énergie serait incertain.

Les organismes d'État ou les organisations professionnelles qui ont pour mission d'organiser la production agricole et sa commercialisation, de concevoir et de créer les infrastructures destinées à son conditionnement, à sa conservation ou à sa distribution ne peuvent établir de programmes rationnels que s'ils sont en mesure de déduire de la connaissance des superficies affectées à telle ou telle spéculation l'importance de la production afférente à chacune d'entre-elles.

Or, seule la pratique généralisée de l'irrigation, seul palliatif à l'irrégularité de la pluviométrie qui, comme nous l'avons vu, constitue à l'heure actuelle la cause essentielle de la variabilité de la production agricole dans les différents secteurs, peut permettre d'atteindre ce but. C'est pourquoi il apparaît inévitable que les irrigations de complément prennent une extension de plus en plus importante et atteignent la quasitotalité des superficies cultivées.

D'ailleurs l'extension des irrigations dans les régions humides apparaît comme la conséquence logique de l'industrialisation du pays, non seulement parce que cette industrialisation qui produit les engrais et les machines agricoles dont l'usage tend à se généraliser peut et doit mettre à la disposition de l'agriculture les équipements dont elle a besoin pour l'irrigation, mais aussi parce que l'agriculture ne saurait conserver un caractère aléatoire et rester indéfiniment soumise au caractère capricieux des précipitations en face d'une industrie qui rationalise ses méthodes de fabrication, planifie sa production et s'efforce d'assurer un revenu et une stabilité sans cesse accrus aux hommes qu'elle occupe. Le processus d'intensification et de stabilisation qui se développe dans l'industrie ne peut pas ne pas s'étendre à l'agriculture.

Certes, dans l'état actuel des techniques de construction des réseaux d'irrigation, compte-tenu du prix des ouvrages correspondants, les coûts annuels à l'ha. dépassent dans un certain nombre de cas marginaux les accroissements de revenus qu'il est possible d'obtenir, mais les progrès qui sont prévisibles dans ce domaine permettent d'envisager pour l'avenir une solution économiquement acceptable dans tous les cas ; ainsi, la mise au point des matériels d'irrigation par aspersion a déjà permis à l'irrigation de se développer dans de nombreuses régions où elle eut été inconcevable par les méthodes traditionnelles.

L'irrigation est un facteur complémentaire d'intensification de l'agriculture qui doit permettre de valoriser les autres facteurs de production déjà mis en œuvre : efficacité accrue des engrais, utilisation plus intensive, donc meilleure rentabilisation du tracteur notamment dans les petites exploitations où il est souvent sous-employé, exploitation plus rationnelle des possibilités offertes par l'emploi de variétés sélectionnées. Inversement, l'irrigation doit être associée aux autres facteurs de production : engrais, amendements, assainissement des terres, choix des espèces végétales, etc... leur valorisation mutuelle accroissant dans de larges proportions la rentabilité de chacun d'eux, pris isolément.

Le développement des irrigations en zone humide s'est d'ailleurs déjà largement amorcé en France. Alors qu'en 1956 aucune demande d'aide financière de l'État n'avait été formulée dans le cadre du programme d'investissement par les départements situés au Nord du parallèle de Lyon, en 1960, 13 départements compris dans

cette zone ont présenté des projets d'irrigation. Aux États-Unis où le mouvement a été amorcé depuis plus longtemps, le développement des irrigations de complément est nettement plus accentué. En 1955, la superficie irriguée dans la zone humide était déjà de 400 000 ha, soit 3 p. 100 de la superficie irriguée dans la zone semi-aride qui atteignait à cette époque 11,2 millions d'ha. Dans l'état de New-Jersey où la pluviométrie moyenne annuelle atteint 1 130 mm, les superficies irriguées sont passées de 11 000 ha, en 1944 (sur 1 003 exploitations), à 25 000 ha en 1955 (sur 1 850 exploitations). Des études économiques entreprises dans cet État ont fait apparaître que le revenu agricole brut qui atteint 50 millions de dollars lors d'une année à bonne pluviométrie, se trouvait réduit à 38 millions de dollars lors d'une année sèche comme 1955.

Nous avons procédé à une étude systématique des besoins en eau d'irrigation de la France en caractérisant ces besoins par bassin versant de façon à pouvoir les comparer aux ressources en eau de surface disponibles sur la base d'une évaluation aussi correcte que possible des superficies susceptibles de bénéficier de l'irrigation. En fait, nous avons exclu, en première approximation, les superficies consacrées à des céréales d'hiver et de printemps pour lesquelles nous avons considéré que les déficits d'approvisionnement en eau sont négligeables, ce qui n'est d'ailleurs pas rigoureusement vrai.

Les résultats de nos évaluations indiquent que la superficie irrigable atteint en France 19 millions d'ha et que les équipements à prévoir devront permettre de distribuer pendant la saison des irrigations un volume de 40 milliards de m^3, correspondant aux déficits de fréquence quinquennale en adoptant un coefficient global d'efficacité des arrosages de 80 p. 100 que seules des techniques perfectionnées d'irrigation rendent possible. D'autre part, l'étude de la répartition dans le temps et dans l'espace des déficits montre que ceux-ci apparaissent avec une fréquence comprise entre 7 et 9 années sur 10 selon les régions et la nature des sols.

II. — INCIDENCE DU DÉVELOPPEMENT DES IRRIGATIONS SUR L'AMÉNAGEMENT DES EAUX

Lorsque la totalité des besoins en eau d'irrigation sera satisfaite, dans un délai que nous avons très raisonnablement fixé à une centaine d'années, en supposant même qu'alors les besoins en eau potable et en eau industrielle aient doublé en raison de l'accroissement de la population et des consommations unitaires, l'agriculture qui est d'ores et déjà le plus grand consommateur d'eau utilisera 50 p. 100 du volume total consommé. Or, les disponibilités en eau de ruissellement de la France calculées d'une part par sommation des débits véhiculés par les cours d'eau et d'autre part en utilisant les abaques de WUNDT-COUTAGNE destinés au calcul des déficits d'écoulement peuvent être évaluées en moyenne à 170 milliards de m^3 (172 par sommation des débits et 158 par calcul des déficits d'écoulement). Le quart de ces disponibilités serait donc mobilisé au profit de l'agriculture.

En fait, s'il n'avait pas été envisagé d'adopter systématiquement des techniques d'irrigation particulièrement perfectionnées, tant en ce qui concerne le transport de l'eau que la distribution à la parcelle, les pertes que nous avons évaluées à 20 p. 100

des besoins, auraient été considérablement plus importantes pour atteindre des valeurs de 50 à 60 p. 100, valeurs couramment atteintes, sinon dépassées, dans les périmètres de conception classique et les volumes à mobiliser auraient été notablement plus élevés.

Il convient de noter que les prélèvements effectifs sur les ressources correspondant aux besoins agricoles évalués comme il a été dit précédemment représentent 80 p. 100 de ces besoins, soit 32 milliards de m^3/an qui sont exportés par évapotranspiration, 8 milliards de m^3 seulement (correspondant aux pertes) étant restitués aux nappes et aux cours d'eau. En revanche, les prélèvements effectifs sur les ressources correspondant aux autres besoins sont nettement plus faibles. En fait, la plus grande partie de l'eau potable et de l'eau industrielle est remise dans le circuit. Certes, dans beaucoup de cas l'eau souterraine est restituée sous forme d'eau de surface mais il n'en reste pas moins que les prélèvements effectifs correspondants, qu'il serait d'ailleurs intéressant d'évaluer, au moins approximativement, doivent vraisemblablement être assez faibles. Par conséquent, si les volumes d'eau dont il convient de prévoir la mobilisation au profit de l'agriculture représentent la plus grande partie du volume correspondant à la totalité des besoins il apparaît que le pourcentage d'eau effectivement soustrait aux ressources par l'agriculture est encore plus élevé.

La généralisation des irrigations sur la plus grande partie de la superficie agrico e utile qui apparaît comme inéluctable à la lumière des considérations précédemment développées et qui va mobiliser au profit de l'agriculture la plus grande partie de l'eau totale utilisée implique de la part des services compétents du Ministère de l'Agriculture l'établissement d'un programme rationnel d'aménagement des eaux car les besoins agricoles sont concentrés au sein d'une période relativement courte qui va, en moyenne, de mai à septembre, période qui correspond à l'étiage des cours d'eau dont le débit global pendant le même temps est inférieur au volume total des eaux nécessaires à l'irrigation et d'autre part la répartition géographique de ces besoins ne coïncide pas avec celle des ressources. Seule la création de multiples réserves petites, moyennes ou grandes, conjuguée avec certains transferts des volumes disponibles en utilisant des voies d'eau existantes ou à créer, est susceptible de créer les ressources nécessaires dans les différents secteurs d'utilisation. Il va sans dire qu'un tel aménagement se traduira par une modification sensible du régime des cours d'eau et contribuera dans une très large mesure à l'écrêtage des crues. La correction des cours d'eau effectuée dans le but de pallier l'effet dévastateur de ces crues, qu'il s'agisse de la protection des lieux habités, des voies de communication et des zones cultivées, devra alors être abordée sur la base des données hydrologiques qui pourront être profondément modifiées, tout au moins dans certains cas. Les problèmes d'assainissement eux-mêmes se poseront en termes différents puisqu'il n'y aura plus lieu de tenir compte, pour fixer la cote de rabattement des plans d'eau, des risques d'assèchement excessif. Enfin, il conviendra que les prélèvements opérés sur les débits d'écoulement, ne provoquent pas un assèchement de certains cours d'eau pendant la période d'étiage, mais que l'exploitation coordonnée des réserves permette de mieux satisfaire les besoins qui peuvent se manifester le long des cours d'eau, qu'il s'agisse du maintien d'un débit suffisant pour la vie aquatique, de l'alimentation des canaux de navigation, des exigences touristiques, de l'approvisionnement en eau des industries ou de tous autres besoins, l'essentiel des débits restant toutefois, comme il a été démontré, mobilisé au profit des irrigations.

III. — NÉCESSITÉ ET OBJECTIFS D'UNE EXPÉRIMENTATION

Dans les régions humides où l'irrigation présente un caractère complémentaire les besoins en eau d'irrigation varient considérablement d'une année à l'autre contrairement à ce qui se passe dans les zones arides ou semi-arides à l'intérieur desquelles les précipitations estivales sont pratiquement nulles tous les ans. Il ne saurait être question d'évaluer ces besoins et de concevoir les équipements en fonction de données moyennes qui ne correspondent pas aux caractéristiques d'un type d'année déterminé, mais il apparaît nécessaire de les étudier de façon fréquentielle en caractérisant le pourcentage d'années correspondant à chaque niveau de déficit. En appréciant l'incidence de chacun de ces niveaux de déficit sur la production, on en déduira, en comparant les charges annuelles et les accroissements de revenus, la classe de besoins correspondant à une fréquence d'apparition déterminée qui devra être adoptée pour l'équipement à réaliser.

Cette étude des besoins ne devra d'ailleurs pas concerner seulement les besoins globaux annuels qui conditionnent la dimension d'une éventuelle réserve et la consommation d'énergie mais encore les besoins du mois de pointe qui doivent être pris en considération pour le calcul des réseaux de distribution fixes et mobiles et des installations de pompage.

Par exemple, pour un besoin moyen annuel de 2 000 m^3 le besoin de fréquence décennale pourra être de 4 000 m^3 pour l'année et de 1 500 m^3 pour le mois de pointe cependant que les besoins de fréquence quinquennale seraient respectivement de 3 000 m^3 et 1 100 m^3. Si l'étude économique démontre que l'accroissement de revenu net annuel moyen est le plus élevé lorsqu'on satisfait les besoins de fréquence quinquennale la réserve, s'il y a lieu de la constituer, correspondra à 3 000 m^3 par ha et les dimensions du réseau correspondront à un débit mensuel maximal de 1 100 m^3.

Cette méthode est la seule qui permette aussi bien dans le cas d'un réseau collectif que d'une exploitation individuelle de concevoir une installation économiquement optimale permettant de conduire à un prix de revient aussi bas que possible. Son application implique une connaissance précise de l'incidence des déficits d'approvisionnement en eau sur la production, des conditions climatiques locales et de la réserve en eau facilement utilisable des sols.

Seules des expérimentations systématiques pourront fournir les éléments d'information correspondants et permettre en même temps d'étudier les modalités de l'irrigation (date et doses).

Cette expérimentation devra confronter dans le cadre d'un dispositif expérimental cohérent un certain nombre de traitements correspondant à la satisfaction intégrale ou partielle des besoins en eau des plantes étudiées. Les bilans d'évapotranspiration seront établis à partir de mesures périodiques du taux d'humidité des différentes couches de sol et la comparaison des rendements obtenus permettra de classer ces traitements les uns par rapport aux autres et de déterminer l'incidence des différents régimes d'approvisionnement en eau.

Les parcelles expérimentales seront irriguées de préférence par aspersion, ce système d'irrigation permettant de répartir très uniformément sur la surface de la parcelle une dose quelconque et de connaître avec précision la quantité d'eau apportée.

La difficulté principale de cette expérimentation réside dans la détermination des bilans hydriques des sols qui implique une connaissance précise des variations de son taux d'humidité et de sa densité apparente jusqu'à une profondeur qui peut atteindre et même dépasser 2 m. La méthode gravimétrique qui est actuellement la seule utilisable pour effectuer ces mesures s'avère d'une précision assez faible, sauf à multiplier exagérément le nombre des prélèvements, en raison des erreurs consécutives à la localisation différente de prélèvements successifs et à l'évaluation de la densité apparente. En outre, les prélèvements demandent beaucoup de temps et peuvent s'avérer impossibles dans certains terrains très caillouteux.

Il serait souhaitable qu'une méthode de mesure plus rapide et plus précise puisse être adoptée. L'utilisation d'appareils à neutrons permettra peut-être, lorsque ceux-ci seront parfaitement au point, de procéder dans d'excellentes conditions à l'établissement de ces bilans hydriques dont la précision conditionne la qualité des résultats issus d'une telle expérimentation.

D'ores et déjà des dispositifs expérimentaux ont été mis en place soit au sein d'Écoles d'Agriculture, soit dans des stations installées dans le cadre de certains aménagements régionaux. Ces protocoles d'essais ont été établis conjointement par le Service du Génie Rural et l'Institut National de la Recherche Agronomique qui suivent ensemble les expérimentations entreprises.

Les résultats obtenus devront permettre aux organismes qui sont responsables de la conception et de la réalisation des ouvrages d'irrigation de disposer des éléments d'information grâce auxquels ils seront en mesure de procéder à des aménagements rationnels.

Reçu pour publication en novembre 1960.

RÉSUMÉ

Les irrigations de complément dans les régions dites « humides » de la FRANCE sont appelées à prendre une grande extension. Elles sont, en effet, susceptibles non seulement de contribuer à l'accroissement de la production mais aussi et surtout, en palliant l'irrégularité de la pluviométrie, cause essentielle de la variabilité des rendements, à réduire les prix de revient unitaires des produits récoltés et à régulariser la production, cette régularisation apparaissant essentielle pour permettre d'orienter valablement la production agricole et faciliter les opérations de conditionnement et de commercialisation. En outre, l'irrigation doit permetre de valoriser les autres facteurs de production mis en œuvre.

Le développement des irrigations de complément s'est d'ailleurs déjà largement amorcé en FRANCE et les études entreprises ont permis de préciser leur possibilité d'extension sur la base de données agricoles et climatiques. La mobilisation de l'eau nécessaire pour satisfaire les besoins correspondants exigera la mise sur pied d'un programme d'aménagement rationnel des eaux qui tiendra compte de l'incidence des aménagements sur le plan hydrologique et qui prendra en considération tous les autres besoins.

Des expérimentations systématiques s'avèrent nécessaires pour définir avec précision ces besoins et les modalités optimales de l'irrigation en fonction de critères économiques. Des dispositifs expérimentaux ont déjà été mis en place et devront permettre de disposer des éléments d'information nécessaires à la mise en place d'aménagements rationnels.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 13-49

631.67 : 631.42

ÉVALUATION DES BESOINS EN EAU D'IRRIGATION, ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

FORMULE CLIMATIQUE SIMPLIFIÉE ET MISE A JOUR (ETp, f. 60)

L. TURC

Laboratoire des Sols, Centre national de Recherches agronomiques, Versailles.

PREMIÈRE PARTIE

PRÉAMBULE SUR L'IRRIGATION

Le progrès de l'irrigation est à l'ordre du jour. Les pays arides sont pressés par la nécessité de cultiver de nouvelles surfaces, inutilisables en culture sèche (cf. Projet majeur zone aride, de l'Unesco), mais les autres pays étendent eux aussi leurs surfaces irriguées ; d'après les indications données au 4e Congrès des Irrigations et du Drainage, à Madrid en 1960, des surfaces de l'ordre de 120 millions d'hectares sont irriguées à cette date, soit 1/3 environ de plus qu'en 1950. Même les pays voisins de la France situés au Nord-Ouest de l'Europe, à climat humide, portent de nouveaux efforts vers la culture irriguée ; c'est à Copenhague que s'est tenue en 1958 la « conférence sur l'irrigation de supplément » (Commission VI de l'Association Internationale de la Science du Sol), et sur les 34 participants, 31 appartenaient aux pays du Nord de l'Europe. Dans le Nord de la France et dans les pays voisins les cultures en terre profonde ne manquent guère d'eau jusqu'au mois de Juillet, mais ensuite, même en terre profonde, le stock d'humidité constitué en hiver n'approvisionne plus la végétation que chichement, et de la mi-Juillet à la mi-Septembre il arrive souvent que les précipitations ne couvrent pas plus de la moitié des besoins ; dans ces régions où la grande culture a pu devenir intensive sans irrigation, on cherche maintenant à la rendre plus intensive encore, et c'est vers l'irrigation qu'on se tourne. On doit ainsi obtenir des accroissements notables de récolte, très différents d'ailleurs selon les sols, et une production beaucoup plus constante d'une année à l'autre, car l'irrégularité de la production, qui perturbe le marché agricole, provient en grande partie de l'irrégularité des précipitations.

Pour établir les projets d'irrigation, puis conduire celle-ci, il faut connaître le mieux possible les besoins des cultures ; on peut ainsi réduire les frais d'équipement par hectare irrigué, et éviter de gaspiller l'eau, d'autant plus que, en même temps

que les besoins de l'agriculture, ceux des populations et de l'industrie vont croissant ; rappelons aussi que des irrigations excessives ont des effets néfastes sur les végétaux et sur les sols, c'est ainsi que des dégâts importants ont été provoqués dans certains pays comme les U. S. A. et le Pakistan pendant la première moitié du siècle.

DEUXIÈME PARTIE

L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

Lorsqu'on irrigue sans être gêné par des sels solubles, l'eau consommée normalement par la végétation et par le sol est l'eau évaporée (on n'envisage pas ici les quantités d'eau perdues, par exemple par percolation profonde dans les canaux) ; il peut être intéressant de rapporter la masse d'eau évaporée à la masse de matière végétale sèche formée (notion de coefficient d'évaporation) ; autrefois on croyait ces cœfficients d'évaporation susceptibles de rendre de grands services pour l'évaluation des besoins en eau d'irrigation ; comme on trouvait des valeurs différentes selon les cultures, on pensait mettre là en évidence un caractère spécifique lié à la physiologie de chaque espèce, et comme de plus les conséquences physiologiques de la sécheresse ou de l'excès d'humidité se manifestent différamment selon les espèces, on était porté à penser que l'aspect physiologique et spécifique du phénomène de transpiration conditionne tous ses caractères, y compris les quantités d'eau évaporées. En réalité, la valeur du coefficient d'évaporation dépend moins de l'espèce végétale que des conditions climatiques pendant la période où se produit l'évaporation considérée, de la durée de cette période et du rendement obtenu pour la récolte.

Plus récemment des études quantitatives portant sur l'évaporation par le sol nu ou par la végétation dans diverses conditions, surtout celles de PENMAN (27 p. 385), ont montré que l'évaporation totale provenant du sol et de la végétation ou « Evapotranspiration » (THORNTHWAITE) se manifestait en première approximation comme un simple phénomène physique, les plantes jouant le rôle de mèches qui mettent à la disposition du pouvoir évaporant de l'atmosphère les réserves d'eau du sol ; si cet approvisionnement est largement assuré, on observe une évapotranspiration plus intense que dans le cas contraire, et qui suit des lois plus simples, THORNTHWAITE la nomme évapotranspiration potentielle (en abrégé ETp). Pratiquement, nous retenons les propriétés suivantes :

1° lorsqu'une végétation vivante et couvrant bien le sol est largement pourvue en eau, les quantités d'eau qu'elle évapore dépendent surtout des conditions météorologiques, si bien que à 20 p. 100 près, et le plus souvent à 10 p. 100 près, elles sont indépendantes du sol et des espèces ou variétés végétales en cause ; ceci est vrai au moins pour des durées suffisantes, 1 mois par exemple.

2° ces quantités sont voisines de celles qui seraient évaporées par une nappe d'eau libre peu profonde placée dans le même site et couvrant la même surface de territoire ; les écarts sont de l'ordre de 20 p. 100, il semble que l'évaporation de l'eau libre est souvent comprise entre ETp et 1,2 × ETp ; les désaccords entre les auteurs qui ont cherché à préciser si la végétation irriguée évapore moins (PENMAN), autant ou parfois peut-être plus (14, 20, 28) que l'eau libre, peuvent provenir des différences entre les climats, entre les divers couverts végétaux, et entre les

diverses surfaces d'eau libre, différences qui subsistent même si certaines précautions sont prises partout (surfaces suffisamment grandes, environnement, couleur du fond, etc...). En ce qui concerne les grands lacs et même semble-t-il les mers, les quantités évaporées par unité de surface sont du même ordre pour des régions voisines, mais seulement en valeurs annuelles, en raison surtout de l'inertie thermique de ces masses d'eau profondes.

En général, l'approvisionnement en eau le plus favorable à une culture, comprenant l'apport des réserves du sol plus celui des précipitations plus le complément apporté par l'irrigation, est celui qui permet d'évaporer la quantité ainsi définie (ETp) ; en réalisant ces conditions on évite sauf exception (flétrissement temporaire) que le pouvoir évaporant de l'atmosphère n'assèche le végétal.

Signalons que lorsque ETp par unité de temps et de surface est faible (inférieur à environ 25 mm par mois), le sol nu maintenu humide par des précipitations suffisantes, telles par exemple que chaque décade il tombe une hauteur d'eau supérieure à ETp de cette décade, évapore à peu près comme la végétation arrosée ou l'eau libre ; lorsque ETp est élevé au contraire, même avec des précipitations suffisantes pour couvrir largement les besoins de la végétation (l'évapotranspiration ET est alors proche de ETp) le sol nu évapore en général nettement moins, son évaporation pourra être de l'ordre de $0{,}6 \times$ ETp.

Penman a développé la théorie énergétique du phénomène. Retenons que la culture reçoit et perd certaines quantités d'énergie, soit par rayonnement soit par conduction et convexion, l'excès des gains sur les pertes est approximativement dissipé par la vaporisation de l'eau mise en jeu par l'ETp. Si l'on irrigue une petite surface enherbée (1 m^2 par exemple) entourée par un terrain plus sec, non arrosé, on constate qu'elle évapore plus par unité de surface qu'une surface plus grande soumise à ce traitement (même si dans les deux cas le terrain environnant porte une végétation analogue d'égale hauteur) ; le bilan énergétique est perturbé par l'environnement, l'évaporation est accélérée, probablement par des turbulences et par des apports latéraux de chaleur ; on nomme cet effet l'effet d'oasis ; dans nos pays oû l'atmosphère est assez humide, dès que la surface irriguée atteint l'ordre de un are, ces perturbations sont faibles, si bien que la grandeur de ETp valable pour les périmètres irrigués est relativement bien définie. Il n'en est pas de même dans les déserts où non seulement ETp par unité de surface a une décroissance plus accusée qu'en France lorsqu'on passe de 1 m^2 arrosé à 1 are arrosé (cf. pour les surfaces d'eau libre, M. Roche, réf. 28), mais où la décroissance se poursuit de façon notable pour des surfaces très grandes ; ETp est alors mal défini, l'effet d'oasis garde toujours une grande place dans l'évaporation sur l'ensemble du périmètre irrigué, bien qu'on s'efforce d'atténuer ses conséquences pour certaines cultures par des rideaux d'arbres.

TROISIÈME PARTIE

ÉVALUATION EN FONCTION DES GRANDEURS MÉTÉOROLOGIQUES

Compte tenu de ce qui précède nous montrons que :

1° lorsque l'atmosphère n'est pas très sèche (humidité relative mensuelle supérieure à 50 p. 100) on peut évaluer ETp pour les périmètres irrigués avec une appro-

ximation habituellement meilleure que 15 p. 100 sous des climats très différents, chauds et froids, maritimes et continentaux, et même en altitude semble-t-il, par la formule :

$$\text{ETp mm/10 jours} = 0{,}13 \times \frac{t}{t+15} \times (\text{I}g + 50)$$

ou bien :

$$\text{ETp mm/mois} = 0{,}40 \times \frac{t}{t+15} \times (\text{I}g + 50)\ (^1)$$

(0,37 pour février)

t = température de l'air sous abri en °C pendant la période considérée
Ig = radiation globale d'origine solaire, directe et diffusée (radiation incidente de courte longueur d'onde) en petites calories par cm² de surface horizontale et par jour, pendant la période considérée.

Remarque : la radiation globale est représentée dans la formule par sa moyenne journalière pour la période considérée, parce que c'est ainsi qu'on l'exprime le plus souvent dans la littérature ; pour donner à la formule une écriture homogène il suffirait de remplacer le facteur constant par 0,013 j, j étant le nombre de jours en cause et 0,013 ayant l'équation de dimension d'un volume divisé par une énergie ; comme la formule est utilisée pour des calculs décadaires ou mensuels, il est commode pour l'exécution des calculs de l'écrire sous la forme proposée en donnant au facteur constant selon les cas les valeurs 0,13 (décade) 0,37 (mois de Février) 0,40 (autre mois).

On voit que la formule annulle ETp avec t, pour t inférieur à 0 on garde ETp = 0 ; cette approximation est suffisante car lorsqu'il gèle l'évaporation est faible, ainsi que pendant le dégel. Lorsque la température dépasse 10 °C on entre dans le domaine où la végétation devient plus active, et la formule donne alors pour ETp des valeurs telles que la vaporisation de l'eau absorbe une énergie comprise entre les 2/5 et les 3/5 de l'énergie incidente de courte longueur d'onde (radiation solaire globale).

La formule se prête à un calcul rapide de valeurs « normales » d'ETp à partir des valeurs normales de t et de Ig, en effet la moyenne des valeurs calculées pour les mois (ou les décades) de même rang pendant plusieurs années diffère peu de la valeur calculée à partir de la moyenne des t correspondants et de celle des Ig ; les écarts ne seraient notables que si Ig avait des valeurs élevées lorsque t est proche de 0°C.

2° lorsque l'humidité relative mensuelle est inférieure à 50 p. 100 nous ajoutons un terme correctif égal à $0{,}40 \times t/(t+15) \times (\text{I}g + 50) \times (50 - h.\,r.)/70$, le calcul ne se fait pas par décade mais uniquement par mois, la formule devient :

$$\text{ETp mm/mois} = 0{,}40 \times \frac{t}{t+15} \times (\text{I}g + 50) \times \left(1 + \frac{50 - h.r.}{70}\right)$$

(0,37 pour février)

le dernier facteur entre parenthèses n'intervient que si $h.\,r.$ est inférieur à 50, on le remplace par 1 lorsque $h.\,r.$ est supérieur à 50 p. 100 (cf. 1°).

« $h.\,r.$ » est l'humidité relative moyenne de l'air pendant le mois considéré, exprimée en p. p. 100 ; plus précisément c'est la valeur calculée à partir de la moyenne mensuelle de la température de l'air sous abri et de la pression partielle moyenne de

(1) Formule proposée à la réunion de l'Association Française pour l'Étude du Sol, 4 mars 1960.

vapeur d'eau pendant le mois ; cette valeur est publiée pour des stations situées dans le monde entier par le périodique de l'U. S. Dept. of Commerce : Monthly climatic data for the world.

On vérifiera plus loin (5[e] partie) que le terme correctif, fonction de l'humidité, de l'air, ne prend des valeurs notables que dans des pays désertiques ou subdésertiques. En France au contraire il n'intervient que très rarement et reste alors à peu près négligeable. Dans les pays méditerranéens même, il est fréquemment faible ou nul, en Algérie par exemple il est nul ou peu important dans les plaines et montagnes littorales et dans une partie de l'Atlas tellien ; jusqu'à 100 km de la mer, les ETp d'Algérie calculés pour une année normale (somme des 12 valeurs mensuelles successives) ne dépassent pas de 5 p. 100 les valeurs calculées sans tenir compte de *h. r.* (c'est à dire comme si *h. r.* était supérieur à 50 p. 100), sauf peut-être sur le vingtième de la surface du territoire considéré.

L'utilisation de la valeur mensuelle « normale » de *h. r.* pour le calcul de ETp mensuel « normal » entraîne d'ordinaire un écart tout à fait négligeable si *h. r.* normal diffère suffisamment de 50 p. 100 (supérieur à 55 p. 100 et alors le facteur en *h. r.* est égal à 1, ou inférieur à 45 p. 100 et alors le facteur est égal à $1 + \frac{50 - h.\ r.}{70}\Big)$; lorsque *h. r.* normal est proche de 50 p. 100 les écarts sont plus notables, mais la plupart du temps ils restent faibles : ce mode de calcul peut conduire à sous évaluer ETp de 3 à 5 p. 100 lorsque *h. r.* normal $=$ 50 p. 100 (l'erreur dépend de la dispersion des valeurs *h. r.* d'un mois de même rang au cours des années).

Evaluation de la radiation globale.

Pour les stations où I*g* n'est pas mesuré, la solution la plus simple est d'utiliser la valeur indiquée sur les cartes de M. I. Budyko (6) ou sur celles de J. N. Black (3) ; les auteurs soulignent le caractère approximatif des cartes qu'ils ont établies, mais, en fait, lorsqu'on dispose d'autres évaluations que les leurs on constate que l'écart est pour la majorité des mois inférieur à 10 p. 100 ; ces cartes représentent des normales mensuelles mais l'emploi de normales n'est pas une faute grave car I*g* reprend chaque année pour le même mois des valeurs souvent voisines.

Lorsque la durée d'insolation, *h*, est connue, nous évaluons I*g* par la formule :

$$Ig = Ig_A\ (0{,}18 + 0{,}62\ h/H)$$

nous indiquons dans l' « Annexe 1 » les valeurs mensuelles des grandeurs astronomiques Ig_A et H.

Ig_A est l'énergie de la radiation qui atteindrait le sol si l'atmosphère n'existait pas ; on l'exprime ici en petites calories/cm² de surface horizontale/jour pour le mois considéré ; son évaluation repose sur les calculs d'Angot, les valeurs du tableau annexé sont indiquées d'après Maurain (22) et d'après Brunt (5).

h/H est l'insolation relative ; H est la duréee astronomique du jour ; *h* est la durée d'insolation mesurée en principe à l'héliographe Campbell, mais l'appareil de Jordan donne des valeurs à peu près équivalentes ; la valeur de *h* utilisée ici est celle qui est publiée par les services météorologiques français, c'est-à-dire qu'elle ne comporte pas de correction de début et de fin de jour (« low sun correction » des publications U. S. A.).

Si enfin on dispose pour deux stations voisines d'évaluations de l'ennuagement, et de mesures de h pour une seule des deux, on peut évaluer l'insolation relative pour la seconde en admettant que, pour le même mois, la somme de l'insolation relative et de la fraction d'ennuagement est la même dans les deux stations ; cette méthode peut aussi s'appliquer aux mois de même rang d'une même station pour des années différentes ; si l'on confronte des valeurs de h/H et de N (le symbole N représentant la nébulosité), on vérifie que la régression linéaire de h/H en N est voisine de $h/\mathrm{H} + \mathrm{N} =$ constante, ce qui justifie cette façon d'évaluer h/H en fonction de N.

Pour la France, signalons que :

— le « Résumé mensuel du temps en France » donne maintenant les valeurs de h pour 72 stations, ainsi qu'une carte d'isolignes ; R. ARLERY prépare des cartes mensuelles pour les moyennes de 15 années.

— les cartes de BLACK donnent des valeurs assez proches des valeurs mesurées de Ig et de celles calculées par la formule $\mathrm{I}g = \mathrm{I}g_{\mathrm{A}}\,(0{,}18 + 0{,}62\ h/\mathrm{H})$, mais plutôt légèrement inférieures ; cette différence est plus accusée dans la région méditerranéenne du pays où elle est souvent d'environ 5 p. 100.

Remarque : la formule $\mathrm{I}g = \mathrm{I}g_{\mathrm{A}}\,(0{,}18 + 0{,}62\ h/\mathrm{H})$ permet aussi d'évaluer les valeurs décadaires de Ig, en fonction des valeurs décadaires de $\mathrm{I}g_{\mathrm{A}}$, H, h.

QUATRIÈME PARTIE

ÉVAPORATION ET TRANSPIRATION EN MILIEU NON IRRIGUÉ ; APPLICATION AUX CULTURES IRRIGUÉES, ÉTABLISSEMENT DE LA FORMULE ETp (f. 60) :

Les études sur l'évapotranspiration potentielle faites au « Laboratoire des Sols » ont découlé de recherches faites antérieurement sur l'évaporation réelle (évapotranspiration en milieu non irrigué).

Ayant étudié les bilans hydriques anunels moyens de bassins de cours d'eau et de cases lysimétriques, S. HENIN publia en 1944 avec J TERNISIEN (17) une formule donnant l'évaporation annuelle moyenne en fonction des précipitations moyennes et d'un terme γ qui inclut les autres facteurs ; γ étant à l'échelle du globe fortement corrélatif de la température annuelle moyenne, S. HENIN donna la même année avec M. GODARD une évaluation de γ en fonction de cette température (16).

En complétant ce travail par l'examen de bassins plus nombreux, répartis sous des climats très différents (254 bassins situés en Europe, en Afrique, en Amérique, à Java) nous avons constaté qu'en modifiant légèrement la formule on la rendait plus satisfaisante (33), le calcul se fait alors non plus en fonction de P (précipitations annuelles moyennes) et de γ mais en fonction de P et de L, L étant la limite vers laquelle tend l'évaporation lorsque, L restant constant, P devient très grand ; L est donc une première évaluation d'ETp mais valable seulement dans des régions très arrosées. La formule s'écrit :

$$\text{I} \quad \mathrm{E\,mm/an} = \frac{\mathrm{P\,mm/an}}{\sqrt{0{,}9 + \mathrm{P}^2/\mathrm{L}^2}}$$

on voit que lorsque $\mathrm{P} \rightarrow \infty$, $\mathrm{E} \rightarrow \mathrm{L}$.

Les évaporations observées sur les bassins de cours d'eau atteignent 1 000 à 1 500 mm/an dans les pays chauds et suffisamment arrosés (Haut-Niger pex.) ; elles sont proches de 480 mm/an dans la plus grande partie de la France, (avec des valeurs de L d'environ 600 mm/an), plus faibles en altitude, plus fortes dans la région méditerranéenne du pays ; dans les pays froids (Finlande, Sibérie), elles s'abaissent vers 200 mm/an ; elles sont très faibles au Sahara en raison de la faiblesse des précipitations. L'examen de nombreux bilans de bassins donne souvent avec une grande sécurité des valeurs annuelles de l'évapotranspiration valables à l'échelle géographique ; on sait que l'évapotranspiration potentielle ne peut être que supérieure ou égale à ces valeurs.

Dès 1945 S. HENIN (15) calculait mois par mois l'évaporation sur les bassins de cours d'eau en fonction des valeurs mensuelles des précipitations et de la température; cette étude étant reprise pour les cases lysimétriques à sol nu, on utilisa pour les calculs décadaires de l'évaporation une formule de même type mais dans laquelle un terme complémentaire représentait la contribution des réserves en eau du sol (18) ; le calcul fut enfin étendu aux cases lysimétriques portant des cultures. Les formules ajustées d'après les résultats des installations de Versailles et de Rothamsted pour les cases nues, de Versailles et de Groningen pour les cases cultivées, ont été éprouvées d'après les résultats obtenus dans d'autres stations, situées en Écosse, en Afrique du Nord, en Inde ; on a pu vérifier que l'évaporation annuelle des cases cultivées est du même ordre (par unité de surface) que celle des bassins de cours d'eau situés sous les mêmes climats, ce recoupement précise la signification des résultats obtenus avec les cases lysimétriques, et montre que la formule établie pour évaluer leur évaporation résume aussi les informations rassemblées dans l'étude des bilans des bassins de cours d'eau.

Pour le sol nu la formule s'écrit :

$$\text{II} \quad E\text{mm}/10 \text{ jours} = \frac{P + a}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + a}{l}\right)^2}}$$

Pour le sol cultivé elle s'écrit :

$$\text{III} \quad E\text{mm}/10 \text{ jours} = \frac{P + a + V}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + a}{l} + \frac{V}{2l}\right)^2}}$$

P est la hauteur des précipitations en mm/10 jours ;
a est la hauteur d'eau maximum susceptible d'être évaporée par le sol nu en 10 jours, en plus des précipitations ;
l est le facteur héliothermique $1/16 \times (t + 2)\sqrt{Ig}$ (¹), car dans ce calcul décadaire nous avons fait l'ajustement en fonction de *t* et de I*g* alors que la température intervenait seule dans le calcul annuel moyen (formule 1).
V traduit l'effet de la végétation ; il est nul en saison froide, lorsque *l* est inférieur à 10 ; lorsque *l* est supérieur à 10, on calcule V au moyen de deux formules, l'une est fonction de la vitesse d'accumulation de matière végétale, et annule V lorsque la végétation est morte (ou absente), l'autre est fonction des réserves d'eau du sol accessibles aux racines et annule V avec ces réserves ; pour chaque décade on prend la plus petite de ces deux valeurs.

(¹) Le symbole I*g* remplace l'ancien symbole I qui prêtait à confusion avec *l* et avec 1.

Cultures irriguées

La formule III est donc d'emploi très général : elle évalue l'évaporation des cultures, mais en faisant V = 0 on retrouve l'évaporation du sol nu, appliquée à un bassin de cours d'eau pendant les 36 décades de l'année elle donne une somme annuelle en assez bon accord avec l'évaporation annuelle déduite des mesures hydrologiques. Nous avons alors proposé d'utiliser III pour le calcul de l'évaporation en culture irriguée, il suffit de donner à « V » une valeur exprimant que la végétation ne manque jamais d'eau et se développe activement.

On a vu que si l est inférieur à 10, V = 0 ; si l est supérieur à 10, on calcule V par la formule suivante lorsqu'il n'intervient pas d'insuffisance de l'approvisionnement en eau :

$$V = 25\sqrt{\frac{Mc}{Z}}$$

M/Z est la masse de matière sèche récoltable formée en moyenne par décade entre la levée et la maturité, exprimée en q/ha ; c est un facteur spécifique égal à 1 dans la majorité des cas (la plupart des céréales, etc...).

On a adopté V = 70, qui correspond à $Mc/Z = 8$, soit si $c = 1$, une accumulation de 8 q de matière sèche par hectare et par décade ; pour ces rendements élevés, l'évaporation calculée ne varie que lentement en fonction du rendement, ainsi il faut une récolte double pour que le calcul donne une évaporation accrue de 1/10^e.

Les valeurs calculées en portant V = 70 dans la formule III sont des évaluations de l'évapotranspiration potentielle (pour $l < 10$ on conserve évidemment V = 0, on peut d'ailleur ménager une transition lorsque l est proche de 10, au lieu de sauter brusquement de V = 0 à V = 70).

Par comparaison avec les précipitations et les réserves du sol on évalue les besoins en eau d'irrigation ; des besoins en eau d'irrigation obtenus expérimentalement dans l'Ouest de l'Europe, aux U. S. A., en Egypte, se sont montrés voisins des besoins ainsi calculés (pour ce qui précède, au sujet des formules I, II, III, et de l'application à l'irrigation, voir réf. 34 — thèse Paris 1953).

Cette formule d'évapotranspiration potentielle a été utilisée dans différents pays, des cartes de déficits en eau de l'agriculture européenne ont été établies par J. C. J. Mohrmann et J. Kessler (23, 24).

Une étude détaillée des déficits en France étant préparée par les hydrauliciens du Génie Rural (Service Technique Central de l'Hydraulique, dirigé par Monsieur Darlot), c'est à leur demande que nous avons entrepris de simplifier la formule (cf. 9).

Simplification de la formule d'ETp.

On pouvait prévoir que la formule se prêterait à être simplifiée ; en effet, la formule III dans le cas général (culture non irriguée) exprime l'évaporation en fonction non seulement du pouvoir évaporant de l'atmosphère mais aussi de l'approvisionnement en eau et du développement de la végétation ; dans le cas du calcul d'ETp, ces deux derniers facteurs de variation ne doivent plus intervenir car par définition l'approvisionnement en eau est toujours largement assuré, ainsi que le rôle conduc-

teur de la végétation ; tout ceci se résume en donnant à V une valeur élevée, V = 70 ; l'expression qui donne l'évapotranspiration potentielle :

$$E = \frac{P + a + 70}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + a}{l} + \frac{70}{2l}\right)^2}}$$

dépend surtout de l, sa valeur est souvent proche de 1,5l.

Examinons de plus près la formule générale, elle peut s'écrire :

$$\frac{P + a + V}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + a}{l} + \frac{V}{2l}\right)^2}} = \frac{P + a + V}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + a + V}{l \cdot \frac{P + a + V}{P + a + V/2}}\right)^2}}$$

Remarque : cette expression est de la forme $y = \frac{x}{\sqrt{1 + (x/u)^2}}$, on voit que le rôle de P dans la formule peut être interprété comme un double rôle : dans $P + a + V = x$, P est un facteur « approvisionnement en eau », E croît avec x qui croît avec P ; dans

$$l \times \frac{P + a + V}{P + a + V/2} = u,$$

P peut être considéré comme représentant l'humidité atmosphérique dont il est corrélatif, en effet u décroît quand P croît, et la décroissance de u fait décroître E.

Pour le calcul d'ETp, le fait que $(P + a + V)$ ait toujours des valeurs assez élevées, puisque $V = 70$, entraîne que E reste assez voisin de $l \times \frac{P + a + V}{P + a + V/2}$ (si $P + a + V$ croissait indéfiniment, l gardant une valeur limitée, E tendrait vers $l \times \frac{P + a + V}{P + a + V/2}$).

Finalement on obtient une approximation plus approchée que $E \# 1{,}5\, l$ indiquée plus haut : $E \# l \times \frac{P + 100}{P + 60}$, soit, puisque $l = 1/16 \times (t + 2) \times \sqrt{Ig}$:

$$\text{ETp mm/10 jours} \# \frac{(t + 2)\sqrt{Ig}}{16} \times \frac{P + 100}{P + 60}$$

dans le domaine envisagé de température, radiation globale, et précipitations décadaires (différents climats du globe) les écarts entre les valeurs de cette expression simplifiée et celles de l'expression initiale sont inférieurs à 1/20^e dans la plupart des cas, et presque toujours à 1/10^e.

Lorsque l est inférieur à 10, $V = 0$, donc $E = \frac{P + a}{\sqrt{1 + \left(\frac{P + a}{l}\right)^2}}$, mais une seconde simplification apparaît : comme ici l est inférieur à 10 et $a = 10$ (sol humide en surface, « a » prend sa valeur maximum), $(P + a)^2/l^2$ est souvent très supérieur à 1 si bien que E est proche de l.

La formule proposée en 1953 donne donc à ETp des valeurs approximativement

proportionnelles à une fonction simple de I*g* et de *t* : $(t + 2)\sqrt{Ig}$, multipliée lorsque *l* est supérieur à 10 par un terme en P qui décroît lorsque P croît (dans ce terme P représente l'humidité atmosphérique dont il est corrélatif) :

ETp = F (I*g*, *t*) × G (P ou humidité atmos.)

Étant amenés à simplifier la formule, nous avons cherché à l'améliorer par la même occasion en donnant à I*g* un rôle relativement plus important par rapport à *t* ; ainsi a été ajustée une fonction de *t* et de I*g* telle que les valeurs de ETp qu'elle donne soient généralement peu différentes de celles obtenues avec l'ancienne formule, et éventuellement en meilleur accord avec l'expérience ; c'est la formule indiquée plus haut (« 3[e] Partie : Évaluation en fonction de grandeurs météorologiques ») :

ETp (f. 60) mm/10 jours = $0{,}13 \times t/(t + 15) \times (Ig + 50)$ (lorsque la valeur mensuelle de *h. r.* est supérieure à 50 p. 100.)

On aurait pu choisir d'autres fonctions, équivalentes dans le domaine qui nous intéresse, mais avec celle-ci l'exécution des calculs est particulièrement simple ; on conserve exactement la même formule pour toute l'année, alors qu'avec la formule III il fallait prendre selon les valeurs de *l* : V = 0 ou V = 70.

Lorsque *t* et I*g* sont faibles, la nouvelle formule, comme l'ancienne, (cas où *l* est inférieur à 10), est proche de $l = (t + 2)\sqrt{Ig}$, en effet la dérivée par rapport à I*g* du rapport de $(Ig + 50)$ et de $\sqrt{Ig}$ s'annule pour I*g* = 50, la dérivée par rapport à *t* du rapport de $t/(t + 15)$ et de $(t + 2)$ s'annule pour $t = 5{,}5$.

Lorsque *t* et I*g* ont des valeurs supérieures à celles qu'ils ont en France en saison froide, le rôle de I*g* par rapport à *t* devient plus important dans la nouvelle formule que dans l'ancienne, la nouvelle se rapproche alors d'une formule en $Ig \times \sqrt{(t + 2)}$, et la variable *P* qui subsistait dans l'ancienne formule (quand $l > 10$), même après simplification, disparaît : I*g* et *t* suffisent (au moins sous nos climats où l'humidité relative mensuelle est supérieure à 50 p. 100) pour retrouver les résultats obtenus antérieurement avec I*g*, *t*, et P, et même pour faire mieux ; en effet, dans une telle formule, empirique et basée sur des corrélations, qui évalue ETp en fonction de grandeurs elles-mêmes plus ou moins corrélatives les unes des autres, le renforcement du rôle d'un facteur peut entraîner la disparition d'un autre facteur : lorsqu'il pleut plus, l'insolation est généralement moindre, le renforcement du rôle de I*g* élimine le facteur P.

On a vu que néanmoins dans les régions très sèches, où le problème se présente d'ailleurs de façon différente (grande importance de l'effet d'oasis), il a fallu faire intervenir l'humidité de l'air ; à cet effet la moyenne mensuelle de l'humidité relative s'est montrée convenable, l'utilisation de la moyenne des minima quotidiens de cette grandeur aurait apporté quelques difficultés. L'idée de faire intervenir l'humidité relative à partir d'un seuil nous a été suggérée par une observation faite au Maroc par A. DARLOT : il semble que, dans ces régions, seules les fortes variations hygrométriques (vents très secs) aient une influence importante sur l'évapotranspiration des périmètres irrigués. Bien qu'il soit théoriquement plus satisfaisant d'introduire en même temps que l'humidité relative l'agitation atmosphérique (vitesse du vent, turbulence), les données dont on dispose et la précision limitée qu'on peut attendre aujourd'hui des évaluations d'ETp ne semblent pas encore pouvoir étayer l'introduction de cette dernière dans une formule établie en vue de l'utilisation pratique dans les différentes régions agricoles du globe (34, p. 52, 68, 69...) ; il serait dif-

ficile d'obtenir une amélioration significative de l'accord entre valeurs mesurées et calculées.

Discussion sur le renforcement du rôle de Ig.

Cette modification a permis de remédier au fait que l'ancienne formule semblait donner en France des évaluations de ETp trop élevées pour Août, Septembre, Octobre, mois relativement chauds, et moins ensoleillés à température égale que les mois précédents (35 p. 542 : « les besoins sont peut être surévalués en Septembre et Octobre dans le bassin parisien »). La nouvelle formule donne dans le bassin parisien pour les 4 mois d'Avril à Juillet des résultats à peu près égaux à ceux de l'ancienne, sur le total des 4 mois les différences sont de 0 à 10 mm ; pour Août et Septembre au contraire les différences sont de l'ordre de 40 mm (p. ex. 15 mm de moins en Août et 20 en Septembre) ; la nouvelle formule donne des résultats un peu inférieurs à ceux de l'ancienne pour Octobre, et supérieurs pour Mars.

Pour des calculs plus anciens, on avait utilisé un facteur héliothermique en $Ig \times (t + 3)$ $\left(\text{ref. 18, } \gamma = \frac{4{,}9}{Ig \times (t+3)}\right)$, mais lorsqu'on a adopté la formule II (sol nu) dans laquelle le facteur héliothermique est représenté par l, $Ig \times (t + 3)$ n'a pu être introduit tel quel pour évaluer l, car il varie plus vite que celui-ci.

On a vérifié (34 p. 65-68 et 188-189) que l'ajustement de l en fonction de t seul donnerait des valeurs trop élevées pour Août et Septembre, à Versailles et à Rothamsted, en fonction de Ig seul au contraire il donnerait des valeurs trop faibles pour ces deux mois ; on a donc ajusté en fonction des deux grandeurs, l'expression retenue : $l = \frac{(t + 2)\sqrt{Ig}}{16}$ semble donner des valeurs légèrement exagérées pour Août et Septembre, si bien qu'on aurait pu choisir une expression donnant un peu plus d'importance à Ig, comme $Ig\sqrt{(t + 2)}$, mais nous avons préféré garder $(t + 2)\sqrt{Ig}$ parce que, Ig étant souvent mal connu, il valait mieux s'exposer à lui donner une place insuffisante plutôt qu'exagérée.

Ensuite vint le calcul pour le sol cultivé : les informations disponibles dans ce cas auraient difficilement permis d'établir une expression en t et Ig significativement préférable à la précédente, la solution la plus simple a donc été de conserver la grandeur $l = 1/16\ (t + 2)\sqrt{Ig}$ du sol nu, quitte à introduire aussi la grandeur $2\,l$ (formule III). Ajoutons que l'évaporation en sol cultivé non irrigué dépend aussi du développement de la culture et le l'approvisionnement en eau, si bien que l'ajustement d'une expression très satisfaisante du facteur héliothermique est plus difficile et moins utile que lorsqu'on étudie directement ETp (cultures irriguées). On pouvait néanmoins prévoir que Ig devrait jouer par rapport à t un rôle plus important en présence de végétation qu'en son absence, divers auteurs (MANZONI 21) ont mis en évidence une corrélation positive élevée entre Ig et la transpiration ; pour le sol nu au contraire une forte irradiation, accélérant la formation d'une croûte superficielle sèche qui joue le rôle de « mulch », semble parfois abaisser l'évaporation ; les phénomènes sont complexes dans les deux cas, mais globalement la transpiration croît plus vite avec la radiation que l'évaporation du sol nu.

On adopte donc une évaluation de ETp qui fait une plus large place à Ig, maintenant que des valeurs assez approchées de Ig sont faciles à obtenir : on a vu que les

cartes de Budyko et celles de Black résolvent très simplement le question ; de nouvelles mesures de radiation globale ont été faites, ainsi que des évaluations d'ennuagement et des mesures de durée d'ensoleillement ; ceci a permis l'établissement des cartes citées, ceci facilite aussi l'utilisation de la formule que nous proposons $Ig = Ig_A$ $(0,18 + 0,62\ h/H)$ (voir annexe 3).

CINQUIÈME PARTIE

RÉSULTATS ; COMPARAISON DES VALEURS CALCULÉES ET MESURÉES

Les ETp, ou parfois les besoins en eau d'irrigation, évalués directement à partir de mesures, ont été confrontés avec les résultats donnés par la formule sous des climats très divers.

1° *Danemark et Suède.*

H. C. Aslyng (1) a publié des résultats de mesures faites près de Copenhague avec des évapotranspiromètres couverts de gazon, de 4 m² chacun.

	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Total
ETp mesuré (en mm)	0	3,5	14	39	75	105	100	109	40	43	10,5	0	539
ETp calculé (en mm)	1,5	0	11,5	41	81	105	107	79,5	55	26	9,5	3	520

Les 6 valeurs mensuelles mesurées les plus faibles sont celles de Novembre à Avril : total = 67 mm, total des valeurs calculées = 66 mm.

Les 6 autres mois donnent au total : valeurs mesurées = 472 mm, valeurs calculées = 454 mm.

Les valeurs de Ig ont été prises sur les cartes de Black.

Signalons que les travaux de O. Tamm (31,32) sur l'évapotranspiration des bassins de rivières en Suède, en dehors des régions de montagne (la plupart de ces bassins sont à moins de 500 m. d'altitude), permettent de donner une première évaluation d'ETp ; dans ce pays froid et boisé, où les précipitations sont surtout estivales, l'évapotranspiration potentielle ne doit pas être très supérieure à l'évapotranspiration effective.

Pour la région de Haparanda, avec une température annuelle moyenne de 1°C, l'évaporation naturelle des bassins versants est de 250 mm par an ; dans la région de Jönköping, avec une température de 6°C, on trouve 395 mm par an.

Compte-tenu des régressions entre l'évaporation et les précipitations, et en considérant aussi la formule 1 relative aux bassins de cours d'eau citée plus haut (4e partie), on peut estimer que les ETp correspondants sont de 260 à 280 mm/an pour Haparanda et de 420 à 450 mm/an pour Jönköping, or la formule proposée ici pour calculer ETp donne pour chacune de ces stations 12 valeurs mensuelles dont les sommes sont respectivement 315 mm et 460 mm : les écarts entre calculs et évaluations basées sur les mesures directes seraient donc d'environ 10 p. 100 ; signalons que dans la région de Jönköping on estime l'évaporation annuelle des lacs à près de 600 mm.

2° *Irlande.*

V. H. GUERRINI (13) a évalué l'évapotranspiration naturelle sur la bassin du Shannon ; on peut penser qu'elle n'est guère inférieure à la valeur « potentielle », en raison des conditions climatiques et de la végétation de cette région. La valeur observée serait d'environ 500 mm/an (des évaluations plus anciennes donnaient 450 et même 400 mais on a jugé depuis qu'elles étaient erronnées).

Le calcul avec la formule ETp (f. 60) donne une somme annuelle de 455 mm, la radiation globale étant prise sur les cartes de BLACK.

V. H. GUERRINI donne ensuite les résultats obtenus avec 4 évapotranspiromètres de 55 cm de diamètre, dans l'ile de Valentia :

	1952					1953							
	Août	S	O	N	D	Janvier	F	M	A	M	J	J	Total
ETp mesuré	92	59	36	8	3	11	7	36	53	40	61	92	498 mm
ETp calculé	70	54	32	17	12,5	14	21	39	56	80	81,5	83	560 mm

Étant donné que l'arrosage a été insuffisant en Mai et Juin (13, p. 104-105), il est préférable d'éliminer ces deux mois ; dans ces conditions, on obtient pour 10 mois comme somme des valeurs mesurées : 397 mm, et pour les calculées : 399 mm ; les 6 mois donnant les valeurs mesurées les plus faibles, d'Octobre à Mars, ont un total de 101 mm, valeurs calculées : 135,5 mm ; les quatre autres mois valables donnent : mesuré = 296 mm, calculé = 263 mm.

Les radiations globales ont été évaluées à partir des mesures de durée d'insolation, mais il est possible que pour l'Irlande la formule adoptée :
$Ig = Ig_A\ (0{,}18 + 0{,}62\ h/H)$ (voir annexe 3) donne, comme pour Rothamsted, des valeurs trop élevées ; une meilleure évaluation de I*g* abaisserait peut-être les valeurs ETp calculées pour Valentia de 5 à 10 p. 100.

3° *France.*

Les anciennes cases lysimétriques de Versailles (DEMOLON et BASTISSE, puis BASTISSE, 1933-1949 ; Réf. 11 et 2) ont été irriguées par un système semi-automatique ; pendant 7 années l'irrigation a été jugée inutile, le calcul d'après la formule proposée ici pour ETp indique en moyenne un besoin d'irrigation de 24 mm/an ; pendant 9 années les cases ont été irriguées et ont reçu en moyenne 104 mm/an, le calcul indique 128 mm /an. Ces calculs de besoins en eau d'irrigation sont déduits des calculs d'ETp en considérant que les réserves d'eau constituées en hiver dans les sol peuvent fournir 100 mm d'eau à la végétation, comme le montre l'étude des bilans des cases non irriguées (34).

Des essais d'irrigation faits sur tabac à Bergerac (J. CHOUTEAU, Réf. 7 ; H. HITIER et coll., Réf. 19) ont montré qu'en 1955 et 1958 l'irrigation a été plutôt néfaste (apports d'environ 35 mm, nous calculons des besoins de 10 mm environ), en 1956 et 1957 elle a provoqué un accroissement assez net de récolte mais une certaine diminution de la qualité (apports = 80 mm environ, nous calculons 20 mm environ) ; l'évaluation des besoins d'après la formule « ETp, f. 60), montre donc que de 1955 à 1958, l'irrigation à Bergerac pour les périodes envisagées (du début de Juin à la mi-Août) aurait dû être nulle ou inférieure aux quantités essayées, ce qui s'accorde avec les résultats défavorables de ces essais.

Près de Clermont-Ferrand, Robelin a observé en 1959 des ETp annuels de 1 000 mm dont plus de 600 mm pour les quatre mois de Mai à Août (communication personnelle ; à paraître) ; ces résultats sont en désaccord avec l'évaluation climatique que nous proposons ici et qui donne 750 mm pour l'année et 445 pour les quatre mois désignés ; les ETp observés paraissent très élevés, on ne peut dire encore si cela est dû à des conditions climatiques locales exceptionnelles. Les résultats de Bergerac déjà cités, et des expérimentations sur les besoins en eau d'irrigation faites dans des stations plus méridionales que Clermont-Ferrand donnent des valeurs plus faibles où à peine supérieures :

Pour les quatre mois de Mai à Août, à Montpellier (E. N. A.), ETp observé est de l'ordre de 450 mm pour environ 560 calculé, à Valabre (basse Durance, École d'Agriculture) la valeur observée est de l'ordre de 650 à 700, le calcul donne 580 environ ; ces résultats, trop dispersés, seront précisés et complétés ultérieurement, ils proviennent d'essais au stade de la mise en route. On peut espérer qu'au cours des prochaines années des résultats seront obtenus pour différentes stations françaises dans des conditions permettant de faire des comparaisons assez valables entre les différentes régions du pays.

Comparons dès maintenant les valeurs d'ETp données en année normale par différentes formules climatiques pour les mois de juin, juillet, août, dans les environs de Paris, avec les valeurs données par ces formules à Clermont-Ferrand et dans la région de Nîmes et Montpellier :

Si on prend comme unité la valeur de ETp dans les environs de Paris, on obtient pour la période indiquée avec la formule que nous proposons ici : 1,07 à Clermont-Ferrand et 1,43 dans la région de Nîmes et Montpellier (valeurs proches de celles données par notre ancienne formule : 1,05 et 1,35) ; la formule de Thornthwaite donne 1,00 et 1,20 ce qui semble trop faible ; si on applique dans ces trois régions la formule de Bouchet (« Piche corrigé »), telle qu'elle a été ajustée pour Versailles, on obtient les rapports 1,20, et 2,20, ce qui semble au contraire excessif. En fait, différentes évaluations donnent des valeurs assez voisines d'ETp dans le bassin parisien, mais les exemples précédants illustrent les incertitudes qui subsistent pour d'autres parties du pays, surtout pour la région méditerranéenne.

Faisant une digression, puisque nous quittons les ETp pour envisager l'évaporation de surfaces d'eau libre, nous pouvons signaler ici des mesures faites autrefois dans la région méditerranéenne : à Arles, entre 1876 et 1882, par A. Salles (29) ; ces essais semblent avoir été soignés puisque les évaporomètres étaient trois bassins de 9 m² chacun, avec des profondeurs différentes (50, 100 et 150 cm d'eau), les trois bassins ont donné des évaporations très voisines ; l'auteur précise comment étaient faites les lectures, le dispositif employé, etc...

Voici les évaporations mensuelles moyennes obtenues par Salles, nous les confrontons avec les valeurs correspondantes ETp (f. 60) :

	Évaporation mesurée (mm)	ETp calculé (mm)		Évaporation mesurée (mm)	ETp calculé (mm)
Janvier	30	24	Juillet	180	169
Février	40	36	Août	150	138
Mars	70	61	Septembre	100	103
Avril	80	94	Octobre	70	62
Mai	120	124	Novembre	40	34
Juin	140	153	Décembre	30	22
			Total annuel	1 050	1 020

La comparaison de ces deux séries de valeurs est intéressante, mais il ne faut pas oublier qu'ici les mesures portent non sur des ETp mais sur des évaporations d'eau libre, qui ne donnent que des ordres de grandeurs pour les ETp.

4° *Maroc.*

A. DARLOT et ses collaborateurs (10) ont effectué des essais pour déterminer les paramètres de l'irrigation dans plusieurs stations marocaines ; ces études se poursuivent.

Les parcelles ont 20 m. sur 5 m. ; chaque culture est soumise à 4 traitements avec 4 ou 8 répétitions. Des prélèvements de terre sont effectués pour déterminer l'humidité, et évaluer les évapotranspirations, compte tenu des quantités d'eau qui proviennent des précipitations et de l'irrigation.

Les valeurs que nous retenons comme « évapotranspirations potentielles mesurées » répondent aux conditions suivantes :

— ce sont les évaluations des auteurs relatives aux traitements qui ont donné les récoltes les plus élevées (dans la plupart des cas, ces traitements sont aussi ceux qui ont comporté les plus fortes irrigations),

— ces évaluations sont considérées entre deux dates telles que la première se situe à environ 20 jours après la date indiquée selon les essais pour la « germination » ou pour la « levée » ; la seconde date se situe 10 jours environ avant la récolte, ou bien au dernier sondage si celui-ci est antérieur.

Les trois stations ont des altitudes de 200 à 300 mètres ; celle des Ouled Gnaou est située entre le moyen Atlas et l'Oum er Rebbia, plus au sud que Kasba Tadla, ses coordonnées sont environ : 32° 20′ N., 7° W Greenwich ; celle de Soueilah est à l'Ouest de Marrakech, à environ 31° 30′ N et 9° W Gr. ; celle de Schouyaya est située non loin d'Oujda, coordonnées : 35° N et 3° W Gr. environ.

Le tableau suivant permet de comparer ETp mesuré et ETp calculé ; entre parenthèses sont indiquées les valeurs d'ETp calculées sans tenir compte des termes correctifs fonctions de l'humidité relative, et ces termes correctifs.

On voit que sur 12 cultures, 6 donnent des écarts entre ETp mesuré et ETp calculé inférieurs à 15 p. 100 ; les 6 autres sont les trois cultures de maïs de la station des Ouled Gnaou et les trois cultures de Schouyaya : quatre d'entre elles étaient considérées par les auteurs comme ne donnant pas des mesures satisfaisantes pour ETp et les écarts sont dans le sens prévu.

Les données météorologiques de la publication citée ont été complétées en utilisant le périodique « Résumé mensuel du temps au Maroc » ; Monsieur AMAYON qui poursuit maintenant ces essais nous a aimablement envoyé des renseignements complémentaires. Les valeurs de I*g* utilisées sont celles des cartes de BLACK. car nous ne disposons pour les stations étudiées ni de mesures de I*g* ni de mesures de durée d'insolation (*h*) ; signalons que si les valeurs de *h* mesurées à Marrakech étaient utilisées pour Soueilah, on calculerait des ETp supérieurs à ceux indiqués ici, la différence étant plus petite que 5 p. 100 ; les valeurs de *h* mesurées à Oujda donneraient pour Schouyaya des ETp calculés inférieurs à ceux déduits des cartes de BLACK, la différence étant plus petite que 5 p. 100 ; pour la station des Ouled Gnaou, d'après *h* de Marrakech et en tenant compte des nébulosités de Marrakech et de Kasba Tadla, on obtiendrait des ETp inférieurs d'environ 5 p. 100 à ceux proposés ici.

Station	Culture	Date	ETp mesuré (mm)	ETp calculé (mm)
Ouled Gnaou	Blé tendre	du 27.1.53 au 11.5	385	358 (354 + 4)
	Blé tendre	du 19.1.55 au 7.5	388	352 (349 + 3)
	Coton	du 16.5.55 au 23.9	787	761 (724 + 37)
	Fèves	du 1.1.55 au 22.4	334	317 (317 + 0)
		Total pour 4 cultures	*1 894*	*1 788 (1 744 + 44)*
	Maïs d'été	du 1.8.54 au 31.10	365	466 (422 + 44)
	Maïs d'été	du 10.8.55 au 24.11	345	439 (430 + 9)
	Maïs de printemps	du 25.5.55 au 23.8	807	546 (519 + 27)
		Total pour 3 cultures	*1 517*	*1 451 (1 371 + 80)*

Les auteurs estiment que les évapotranspirations du Maïs de printemps sont surévaluées (communication personnelle), et que celles des Maïs d'été ont été diminuées en raison de dégâts subis par les cultures et des faibles rendements qui en résultent.

Station	Culture	Date	ETp mesuré (mm)	ETp calculé (mm)
Soueilah	Blé tendre	du 20.1.55 au 30.4	390	344 (328 + 16)
	Fèves	du 1.1.55 au 30.4	400 (environ)	383 (367 + 16)
		Total pour 2 cultures	*790*	*727 (695 + 32)*
Schouyaya	Blé tendre	du 20.2.55 au 20.5	266	328 (328 + 0)
	Maïs d'été	du 1.8.55 au 20.10	446	366 (366 + 0)
	Maïs de printemps	du 11.5.55 au 15.8	455	553 (553 + 0)
		Total pour 3 cultures	*1 167*	*1 247 (1 247 + 0)*

Les auteurs estiment que le Maïs de printemps a été insuffisamment irrigué, ce qui entraîne une sous estimation de l'évapotranspiration potentielle.

Considérons maintenant pour la même station les ETp mesurés de différentes cultures pendant le même mois et pendant les mois de même rang d'années différentes ; calculons la moyenne, et celle des ETp calculés correspondants, on obtient :

Station des Ouled Gnaou

	ETp mesuré	ETp calculé		ETp mesuré	ETp calculé
Janvier	63	67	Juillet	302	193 (187 + 6)
Février	72	69	Août	160	181 (171 + 10)
Mars	103	94	Septembre	159	156 (146 + 10)
Avril	145	125	Octobre	68	108 (106 + 2)
Mai	160	167 (153 + 14)	Novembre (24 1ers jours)	41	65
Juin	204	181 (168 + 13)	Total	1 477	1 406 (1 351 + 55)

la valeur 302 mm indiquée pour juillet est la moyenne entre 227 (coton) et 378 (maïs de printemps), mais cette dernière semble très surévaluée (cela a été signalé plus haut), si bien que la moyenne elle-même est excessive, les 227 mm mesurés pour le coton représenteraient probablement une meilleure évaluation de ETp ; pour octobre et novembre par contre, les « ETp mesurés » sont probablement trop faibles, car ils proviennent uniquement des expériences sur les maïs d'été, or les auteurs ont signalé que ces maïs semblent avoir évaporé des quantités d'eau inférieures aux grandeurs « potentielles ».

Pour les 6 mois d'évaporation intense, d'avril à septembre : ETp mesuré = 1 130 mm (1 055 si on écarte la mesure faite pour le maïs en juillet), ETp calculé = 1 003.

Pour les mois restants : ETp mesuré = 347 mm, ETp calculé = 403 mm.

Station de Soueilah

	Janvier	Février	Mars	Avril	Total
	—	—	—	—	—
ETp mesuré	70	86	115	145	416
ETp calculé	65	73	98 (97 + 1)	147 (132 + 15)	383 (367 + 16)

Station de Schouyaya

	ETp mesuré	ETp calculé		ETp mesuré	ETp calculé
	—	—		—	—
Février (du 20 au 28) ..	16	24	Juillet	190	194
Mars	55	93	Août	150	165
Avril	128	118	Septembre	234	133
Mai	88	149	Oct. (du 1er au 20)	82	68
Juin..................	128	172	Total...........	1 071	1 116

pour les 6 mois d'avril à septembre, cela fait ETp mesuré = 918 mm et ETp calculé = 931.

Octobre (incomplet) plus février (incomplet) plus mars donne : ETp mesuré = 153 ; ETp calculé = 185.

5° *Tunis*

J. Damagnez (8) mesure des ETp près de Tunis ; la publication donne des résultats de 1957, 1958, 1959, nous écartons ceux de la première année, année de mise en route, suivant les conseils de l'auteur (communication personnelle).

Pour évaluer ETp avec notre formule nous avons pris les températures dans « Climatologie de la Tunisie, 1952 », ce sont les normales de 1901-1950, les valeurs de 1958 et de 1959 en sont très proches ; *h* est pris dans la même publication, ce sont les normales de 1927-1948, I*g* calculé par la formule Ig_A (0,18 + 0,62 h/H) est très voisin des valeurs indiquées par les cartes de Black (différence pour l'année : 2 p. 100) ; *h. r.* n'intervient pas car il est supérieur à 50 p. 100 tous les mois.

	ETp mesuré	ETp calculé		ETp mesuré	ETp calculé
	—	—		—	—
Janvier	31	42	Juillet	251	187
Février	35	53	Août	173	169
Mars	71	80	Septembre	129	128
Avril	155	112	Octobre	99	89
Mai	172	142	Novembre	45	59
Juin..................	185	172	Décembre........	45	41
			Total...........	1 391	1 274

pour 6 mois sur 12 la différence entre valeur mesurée et calculée est inférieure à 15 p. 100.

En groupant les ETp mensuels par semestres on obtient :
d'avril à septembre, ETp mesuré = 1 066 mm, calculé = 910 mm ; d'octobre à mars, ETp mesuré = 325 mm, calculé = 364 mm

6° *Iraq*

C. Stork (30) étudie des champs irrigués et drainés, les parcelles mesurent 25 m × 135 m ; les conditions du sous sol et le système de drainage sont tels qu'ont peut penser que les drains recueillent la presque totalité de l'eau en excès. Le tableau de la page 275 (30) indique pour chaque mois les quantités d'eau apportées par les pluies

et par l'irrigation, les quantités recueillies par les drains, et la différence ; ces différences ne peuvent être retenues comme évaluations d'ETp que pour les mois remplissant les conditions suivantes :

Il faut que la végétation se développe activement (on exclue les mois où le sol est nu et les mois des semailles) ;

Il faut que l'irrigation soit pratiquée non seulement pendant le mois considéré mais aussi pendant le mois précédant afin que, le sol étant bien pourvu en eau pendant tout le mois, on puisse considérer que son stock d'eau n'a pas subi de trop forte variation du début à la fin.

Les coordonnées de la station sont approximativement : 32° 30′ N, 46° 15′ E Gr., altitude : 12 m.

Culture	Date	ETp mesuré (mm)	ETp calculé (mm)	(sans h. r. + terme correctif)
Phaseolus aureus	Août 1956	212	266	(196 + 70)
	Septembre	189	232	(173 + 59,5)
Orge	Janv. 1957	41	46	(46 + 0)
	Février	67	67,5	(67,5 + 0)
	Mars	99	88,5	(88,5 + 0)
P. aureus	Juil. 1957	334	305	(225 + 80,5)
	Août	294	279	(210 + 69)
	Septembre	210	238	(179 + 59)
Orge	Janv. 1958	90	51	(51 + 0)
	Février	85	75,5	(75,5 + 0)
	Mars	119	127	(116 + 11,5)
	Avril	83	157	(134 + 23)

On a utilisé la formule $Ig = Ig_A\,(0{,}18 + 0{,}62\,h/H)$, les cartes de BLACK indiqueraient des valeurs supérieures d'à peine 2 p. 100.

Sur 12 mois, et bien que le mode de mesure se prête mal à l'évaluation des bilans mensuels, quatre mois seulement ont des écarts supérieurs à 15 p. 100 entre ETp mesuré et ETp calculé : ce sont août et septembre 1956 avec — 20 p. 100 et — 18 p. 100, et janvier et avril 1958 avec + 76 p. 100 et — 47 p. 100.

Valeurs totales de ETp pour chaque type de culture :

P. aureus, de juillet à septembre, 5 mois en deux campagnes, mesuré = 1 239 mm, calculé = 1 320 (983 + 338) ; Orge, de janvier à avril, 7 mois en deux campagnes, mesuré = 584 mm, calculé = 611 mm (577 + 34).

7° *Lac Tchad*

L'évaporation de cette grande surface d'eau a été évaluée par A. BOUCHARDEAU (4, voir aussi M. ROCHE : 28) ; bien qu'il ne s'agisse pas exactement du problème étudié ici, mais d'un problème voisin, nous examinons ces résultats car on dispose pour ce lac d'une évaluation probablement assez juste, valable à l'échelle géographique et donnant une valeur de l'évaporation particulièrement élevée (cf. les valeurs observées pour les autres stations citées dans ce mémoire).

Le bilan du lac donne de 1953 à 1956, compte-tenu de la faiblesse probable de l'infiltration, une évaporation annuelle estimée à 2 260 mm (4, p. 420). ETp correspondant pourrait donc avoir une grandeur située entre 2 260 mm/an et 0,8 × 2 260 = 1 810 mm/an.

D'après les données météorologiques des stations situées autour du lac (Fort-Lamy, N'guimi, Mao, Maïné Soroa ; voir « Annuaires des services météorologiques de

la France d'Outre Mer ») nous calculons des ETp dont la somme annuelle est 1 950 mm : 1 670 calculé sans tenir compte de *h. r.*, plus 280 pour le terme correctif en *h. r.* ; en prenant I*g* sur les cartes de BLACK, on trouverait 5 p. 100 de plus.

8° *Franceville*

M. ROCHE (28) estime (p. 16-17) que sous climat humide équatorial, dans la région couverte par la forêt, l'évaporation se poursuit toute l'année, et que l'évaporation effective sur les bassins de cours d'eau est voisine de celle des nappes d'eau libre ou même supérieure à celle-ci. Dans ces conditions nous pouvons admettre que l'évapotranspiration potentielle diffère peu de cette « évaporation effective », qui est égale au « déficit d'écoulement » des bassins versants (carte 4 p. 18).

Pour Franceville la carte publiée par ROCHE indique un déficit d'écoulement de 1 100 mm/an ; le calcul de ETp donne 1 155 mm (si on prend I*g* des cartes de BLACK, on trouve 1 065 mm).

9° *Congo*

G. L. DUPRIEZ (12) a donné une étude détaillée de l'évapotranspiration au Congo et au Ruanda Urundi, pour 9 stations dispersées dans des régions très différentes.

La station de Kisozi, qui est celle pour laquelle les mesures, comme nos calculs, donnent les plus faibles valeurs de ETp, se distingue par son altitude élevée : 2 155 m, alors que les autres stations s'étagent de 450 m à 1 260 m.

Les cuves lysimétriques employées ont chacune 4 m² de surface et 70 cm de profondeur, elles sont couvertes de *Paspalum notatum* et arrosées chaque jour ; un are de terre environnant est également arrosé en saison sèche. Pour les données météorologiques, voir « Bulletin climatologique annuel du Congo Belge et du Ruanda Urundi » ; nous devons à l'obligeance de Monsieur F. BULTOT des renseignements complémentaires.

Station	Année	ETp mesuré	ETp calculé
Yangambi	1957	1 121	1 353
	1958	1 157	1 385
Bambesa	1957	1 274	1 451
	1958	1 302	1 453
Bongabo	1957	1 059 (corrigé)	1 417
	1958	1 069	1 423
M'Vuazi Vallée	1957	1 098	1 160
	1958	1 044	1 182
Kiyaka	1957	1 133	1 386
	1958	1 245	1 448
Gandajika	1957	1 328	1 435
	1958	1 390	1 504
Keyberg	1957	1 305	1 456
	1958	1 244	1 340
Kisozi	1957	1 009	1 116
(Ruanda Urundi)	1958	1 091	1 136
Musasa	1957	1 475	1 385
(Ruanda Urundi)	1958	1 581	1 402
Total		21 925	24 432

Si au lieu d'évaluer Ig à partir des durées d'insolation on utilisait les valeurs de BLACK, on calculerait des ETp assez peu différents de ceux indiqués ici : la moyenne générale serait inférieure de 2 p. 100, et sur les 18 valeurs considérées, trois seulement présenteraient des différences supérieures à 10 p. 100, il se trouve d'ailleurs que ces trois valeurs seraient plus proches des valeurs mesurées que les ETp calculés présentés ici.

Bien que la moyenne des 18 valeurs annuelles calculées : 2 4432/18 = 1360 mm et celle des 18 valeurs mesurées : 21925/18 = 1220 mm, diffèrent de 10 p.1 00 environ, on remarque que 5 valeurs seulement sur 18 présentent des écarts supérieurs à 15 p. 100 (25 p. 100 au maximum), la moyenne des écarts arithmétiques est de 169 mm, la corrélation linéraire entre les 18 valeurs mesurées et les 18 valeurs calculées est significative (*p* inférieur à 2 p. 100). Un calcul basé principalement sur l'emploi des températures au contraire, qui donne un moindre écart entre les moyennes générales (4 p. 100), donne par contre sur 18 écarts annuels 9 écarts supérieurs à 15 p. 100 dont trois supérieurs à 30 p. 100, l'écart arithmétique moyen est de 233 mm, la corrélation entre les 18 valeurs mesurées et calculées n'est pas signiffcative, elle est même négative ; ceci semble confirmer la supériorité des formules basées, comme celle que nous proposons, sur l'utilisation de la radiation globale.

10° *Ceylan*

C. R. PANABOKKE (25) a évalué l'évapotranspiration en parcelles cultivées (coton, maïs, etc...) de 6,1 m × 3,05 m ; l'humidité du sol est mesurée sur les prélèvements de terre, et également déduite de la résistance électrique de blocs de plâtre.

Les précipitations sont telles que les ET publiés par l'auteur doivent être proches des ETp.

Période	ETp mesuré (mm)	ETp calculé (mm)
—	—	—
D'octobre à janvier (4 mois), 5 cultures............	de 400 à 480	460
Novembre et décembre (2 mois), 2 cultures	198 et 210	218
Avril et mai (2 mois), 2 cultures	327 et 335	315

On peut craindre que la dernière valeur, relative à une période ou les précipitations sont moins abondantes, soit inférieure à la valeur « potentielle » de ET, mais l'auteur donne les valeurs mensuelles de l'évaporation d'un bac d'eau libre : d'octobre à janvier, le bac évapore en moyenne 119 mm par mois, en avril et mai, 190 mm par mois ; en supposant que le rapport $\frac{\text{E bac (Oct., Janv.)}}{\text{E bac (Avril, Mai)}}$ soit égal au rapport des ETp correspondants, et comme ETp (octobre, janvier) est d'environ 107 mm, on calculerait ETp (avril, mai) = 170 mm/mois, ce qui est proche de la valeur observée (166 mm).

Tableau général résumant les comparaisons entre ETp mesuré et ETp calculé (formule ETp, f. 60*).*

Pour chaque station on considère la moyenne mensuelle des valeurs ETp pour la période de l'année où l'évaporation est intense, et la moyenne mensuelle pour l'autre période de l'année (en classant les mois de chaque station dans l'ordre des valeurs décroissantes de « ETp mesuré ») ; on excepte Franceville et le Congo pour

lesquels on ne considère que la moyenne des 12 mois de l'année, car dans ces pays la variation au cours de l'année est relativement faible. Pour que le Congo ne tienne pas une place excessive dans ce tableau général, les 9 stations congolaises ont été groupées assez arbitrairement par deux dans l'ordre des ETp mesurés décroissants, la dernière station: Kisozi, qui se distingue également par son altitude élevée, restant seule.

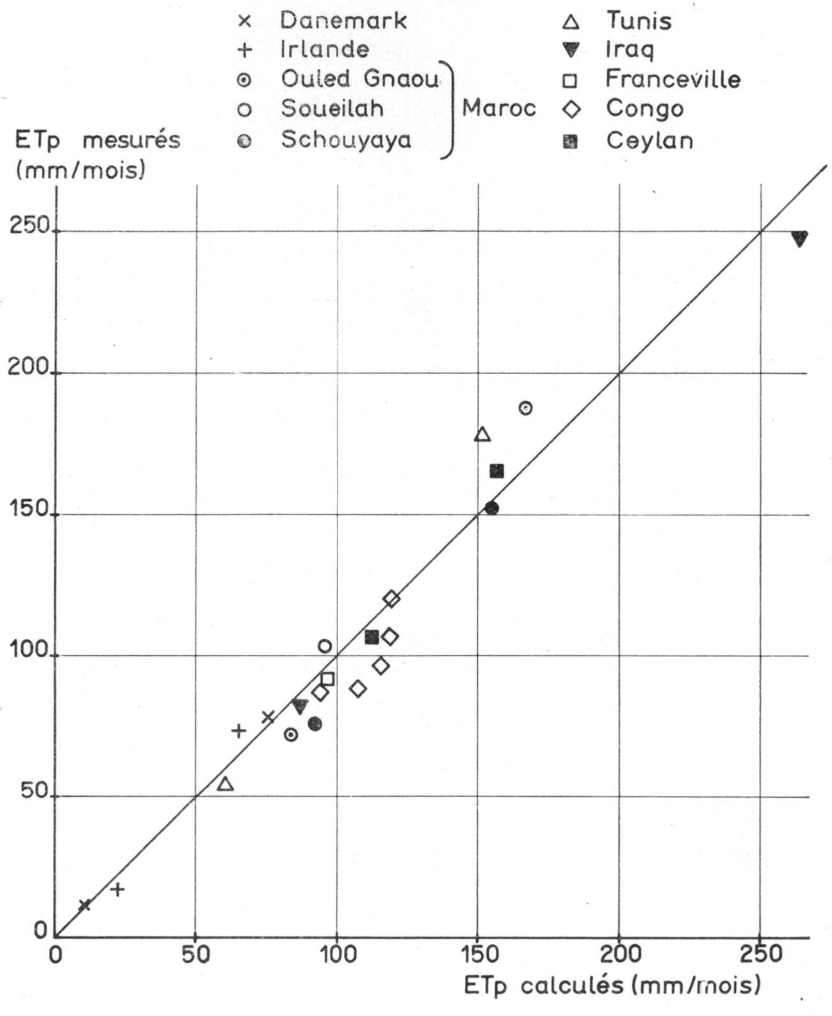
Dans la majorité des stations, les humidités relatives de tous les mois sont supérieures à 50 p. 100, le calcul se fait donc sans utiliser « *h. r.* » ; pour les stations restantes, nous indiquons entre parenthèse les valeurs qu'on obtiendrait sans « *h. r.* » et les termes correctifs calculés avec « *h. r.* ».

Station	Époque	ETp mes. mm/mois	ETp calc. mm/mois	Mes./Calc.	(Mes.-calc.) mm/mois
Danemark :					
près Copenhague	Nov. à avril	11,2	11	1,02	+ 0,2
	Mai à oct.	78,7	75,7	1,04	+ 3
Irlande :					
Valentia	d'oct. 52 à mars 53	16,8	22,6	0,74	— 5,8
	Août et sept. 52, avr. et juil. 53	74	65,7	1,12	+ 8,3
Maroc :					
Ouled Gnaou ...	d'oct. à mars (déc. manque, nov. incomplet)	72 (trop faible)	84	0,86	— 12
	d'avril à sept.	188 (trop fort)	167 (158 + 9)	1,12	+ 21
Maroc :					
Soueilah	de janv. à avril	104	96 (92 + 4)	1,08	+ 8
Maroc :					
Schouyaya	Fév. et oct. incomplets, mars	76,5	92,5	0,82	— 16
	Avril à septembre	153	155	0,99	— 2
Tunis	d'oct. à mars	54,2	60,7	0,89	— 6,5
	d'avril à septembre	177,7	151,7	1,17	+ 26
Iraq :					
Dujailah	de janv. à avril	83	87 (82 + 5)	0,95	— 4
	de juil. à sept.	248	264 (197 + 67)	0,94	— 16
Alentours du lac Tchad	Toute l'année	de 150 à 190 ?	162 (139 + 23)		
Franceville	Toute l'année .	92 au moins	96,5	0,95	— 4,5
Congo :					
Kisozi	Toute l'année	87,5	94	0,94	— 5,5
Bongabo et M'Vuazi Vallée..	— d° —	89	108	0,82	— 19
Yangambi et Kiyaka	— d° —	97	116	0,84	— 19
Keyberg et Bambesa	— d° —	107	119	0,90	— 12
Gandajika et Musasa	— d° —	120,5	119,5	1,01	+ 1
Ceylan :	d'oct. à janv.	107	113	0,95	— 6
	avril et mai.	166	157	1,06	+ 9

Ces valeurs sont reportées sur le graphique.

Les stations sont situées sous des climats très différents, et comme on distingue pour une même station les ETp faibles et les ETp élevés, on dispose ici de 21 valeurs mesurées qui s'étagent de 10 mm/mois à 250 mm/mois ; la comparaison avec les valeurs calculées correspondantes montre que les écarts entre valeurs mesurées et

calculées dépassent 15 p. 100 dans cinq cas, le pourcentage maximum est atteint à Valentia pour la période froide : écart de 26 p. 100 (en valeur absolue : 6 mm/mois).



SIXIÈME PARTIE

APPLICATIONS ; CONCLUSIONS ET PROGRÈS A VENIR

Application 1

Une fois les ETp évalués, il reste à en déduire les besoins nets en eau d'irrigation, en comparant avec les précipitations, compte tenu des caractères du sol et du développement des racines ; nous n'exposons pas ici la conduite de ces calculs. Rappelons que l'utilisation par la culture des précipitations du mois en

cours ou même de la décade en cours suppose évidemment la présence d'un sol cultivable qui ne soit pas excessivement léger et mince ; cette condition étant assurée, l'influence des caractères du sol sur les besoins en eau d'irrigation intervient surtout à propos de l'importance et de l'utilisation des réserves en eau constituées pendant les mois qui précèdent celui pour lequel on étudie l'évapotranspiration et les besoins.

Les variations des réserves en eau du sol pendant les périodes où le sol est nu et pendant celles où la végétation manque d'eau sont évaluées au moyen des formules établies antérieurement à cet effet (formule II et III, réf. 34).

Après l'évaluation des besoins nets, on passe aux quantités à distribuer en tenant compte du « rendement de l'irrigation », qui dépend des pertes diverses (infiltration profonde, ruissellement).

Application 2

En dehors des problèmes techniques d'irrigation, l'évaluation des valeurs ETp et des besoins nets en eau d'irrigation doit permettre de préciser les indices climatiques utilisables dans l'étude des formations végétales. Ch. P. PEGUY (26, p. 254) signale la confusion existant dans ce domaine pour l'utilisation de la température (ou d'une grandeur corrélative), qui est par elle-même un facteur positif du développement végétal, mais qui peut être aussi un facteur de sécheresse, gênant la végétation. Cette question s'éclaircit lorsque on tient compte de l'existence de ces deux effets distincts : il faut d'abord établir un indice indépendant des précipitations et valable uniquement lorsque la végétation ne manque pas d'eau, soit que les précipitations soient suffisantes, soit que d'autres apports (irrigation) y suppléent ; ensuite, on introduira un facteur sécheresse destiné à abaisser la valeur de l'indice précédent, le facteur sécheresse est fonction de ETp et du besoin en eau d'irrigation.

Conclusions

La formule proposée ici pour l'évaluation de l'évapotranspiration potentielle à partir de grandeurs météorologiques est très simple. On est parti pour l'établir d'une formule destinée à évaluer l'évapotranspiration en milieu non irrigué ; on a montré que, lorsque celle-ci est appliquée au cas du milieu irrigué on peut lui apporter de grandes simplifications ; par la même occasion on a amélioré la formule ; l'amélioration porte approximativement sur le domaine de conditions climatiques où ETp est supérieur à 25 mm/mois, et consiste en un renforcement du rôle de la radiation globale, renforcement rendu opportun par les progrès faits depuis quelques années dans la connaissance de cette grandeur météorologique.

La formule ayant été éprouvée pour des stations de climats très différents, on peut admettre avec une grande confiance qu'elle donne des évaluations de ETp avec une erreur inférieure à 15 p. 100 plus de une fois sur deux (près de deux fois sur trois) pour un mois, et plus de deux fois sur trois (environ trois fois sur quatre) pour des périodes de plusieurs mois. Les écarts ont été évalués en comparant les valeurs « calculées » et les valeurs « mesurées », or ces dernières sont sujettes elles-mêmes à des erreurs notables, d'ailleurs la grandeur ETp n'est généralement pas définie à mieux que 10 p. 100 près ; les résultats indiqués ici doivent donc être considérés comme satisfaisants.

La radiation globale a été évaluée la plupart du temps en fonction de la durée

d'insolation (voir annexe 3), mais en utilisant plus simplement les valeurs lues sur les cartes de BLACK (3) ou sur celles de BUDYKO (6), on obtiendrait des écarts entre ETp calculés et ETp mesurés situés dans les intervalles qui viennet d'être indiqués, les résultats seraient donc presque aussi satisfaisants.

L'humidité relative n'intervient de façon notable dans le calcul que pour les pays très secs, où d'ailleurs ETp est mal défini. Pour la majorité des exemples traités ici, elle n'intervient pas. On pourrait envisager ultérieurement d'introduire l'humidité atmosphérique dans tous les calculs, pour obtenir une approximation un peu plus poussée; peut être des essais d'irrigation au bord de la mer, intéressants en tout état de cause pour des raisons agricoles et climatologiques (rupture de corrélations, agitation de l'air), permettraient-ils d'étayer cette introduction, qui pourrait être tentée en utilisant une fonction linéaire de la formule actuelle et de la formule de DALTON ; on pourrait aussi envisager l'utilisation d'autres variables comme l'amplitude quotidienne de température ; un facteur correctif fonction de la durée du jour pourrait peut-être apporter de légères améliorations aux résultats. L'introduction de termes qui diffèrent selon les espèces cultivées et selon les stades de végétation ne pourra être faite qu'avec prudence.

On vient de signaler des perspectives d'avenir mais dans l'immédiat il semble difficile d'ajuster une formule donnant des accords significativement meilleurs avec les résultats de l'expérimentation ; on risque de compliquer le calcul pour rechercher des améliorations qui dans la pratique se montreraient souvent illusoires.

Reçu pour publication en novembre 1960.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) ASLYNG H. G., 1958. Climatic aspects of supplemental irrigation. *Comm.* **6**, *Assoc. Int. Sci. Sol,*. Copenhague, p. 3.

(2) BASTISSE E. M. Observations en cases lysimétriques. Recherches sur la fertilisation parues dans les *Annales Agronomiques* de 1944 à 1949. Dix huit années d'études appliquées à l'agronomie *Ann. Agr.*, 1951, (v. p. 728 et 737), 1953 (v. p. 55 et 57).

(3) BLACK J. N. 1956. The distribution of solar radiation over the earth's surface *Arch. f. Meteor., Geoph. u. Bioklim*, S. B., **2**. H., *Univ. of Adelaide, Waite agr. Res. Inst.*, Adelaïde, Australia.

(4) BOUCHARDEAU A. 1957. Etudes d'évaporation dans les régions sahélo-soudaniennes. A. I. H. S. *Ass. Gén. Toronto.* t. 3. p. 407-420.

(5) BRUNT D. Physical and dynamical meteorology. *Cambridge Univ. Press.* 1934 et 1939.

(6) BUDYKO M. I. 1955. Atlas Teplovogo Balansa, Leningrad.

(7) CHOUTEAU J. 1956. Détermination de l'évapotranspiration d'un sol cultivé en tabac. *Ann. Inst. Exp. Tabac, Bergerac*, vol. II, n° 3.

(8) DAMAGNEZ J. 1960. Le sol, l'eau, et la plante. *La Tunisie Agricole (numéro de mars)*.

(9) DARLOT A. 1960. L'avenir de l'irrigation en France : les besoins en eau de l'agriculture *L'eau*, 47^{me} année, **12**, p. 303-321.

(10) DARLOT A. 1956. Contribution à une détermination rationnelle des paramètres de l'irrigation ; essais effectués sur les Stations Expérimentales d'Hydraulique Agricole des Ouled Gnaou (sous la conduite de M. GUTH et M. GOUDEAU), de Soueilah (M. LE LANDAIS) et de Schouyaya (M. LAGACHE). *Cah. Centre Rech. Exper. Gén. Rur.* Rabat.

(11) DEMOLON A et BASTISSE E. M. Observations en cases lysimétriques Recherches sur la fertilisation parues dans Rapports annuels de l'*Inst. Rech. Agron.* de 1932 à 1943. Observations lysimétriques sur l'évolution d'un sol de limon. *Ann. Agr.* 1940, p. 226.

(12) DUPRIEZ G. L. 1959. La case lysimétrique de *Thornthwaite* comme instrument de mesure de l'évapotranspiration en régions équatoriales. A. I. H. S. colloque de Hann. Münden. t. **2**, p. 84-98.

(13) GUERRINI V. H. Evapor. and transpir. in the irish climate, Dept. Ind. Comm, Meteor. serv., Techn. note n° 14, Dublin 1953 (voir aussi : A year of evapo transpir. in Ireland, dans : Measurement of evapotranpir. J. R. MATHER, Seabrook, 1954).

(14) HARROLD L. L. et DREIBELBIS F. R. Evaluat. of agricult. Hydrology by monolith lysim eters 1944-1955. *Techn. Bul.* 1179, U. S. *Dept. Agr., Ohio Agric. Exp. Stat.*

(15) HENIN S. oct. 1945. Précipitations et déficit d'écoulement — Congrès de la Victoire, *Ass. Fr. p. l'Avanc. des Sc.*

(16) HENIN S. et GODARD M. 1944. Relations entre l'évaporation, la température et l'indice d'aridité. *C. R. Acad. Sc.* **219**, p. 559.
(17) HENIN S. et TERNISIEN J. 1944. Sur une relation entre la pluviosité, le drainage et l'évaporation. *C. R. Acad. Sc.*, **219**, p. 80.
(18) HENIN S. et TURC L. 1949. Relation entre les facteurs climatiques et le drainage du sol nu au cours de l'année. *C. R. Acad. Sc.* **228**, p. 1876.
(19) HITIER H., CHOUTEAU J., MOUNAT A. et RENIER A. 1959. Influence de l'arrosage par aspersion sur le rendement et la qualité des tabacs. *Ann. inst. Exp. Tabac,* Bergerac, vol. 3, nº 2.
(20) KOHLER— M. A. 1957. Meteorological aspects of evaporation phenomena. A. I. H. S., *Ass. Gén. Toronto,* t. **3**, p. 421-436.
(21) MANZONI L. 1954. Consommation hydrique de la transpiration des plantes. A. I. H. S., Rome, t. **3**, p. 142.
(22) MAURAIN Ch. 1937. Etude pratique des rayonnements solaire, atmosphérique et terrestre. 1 vol. GAUTHIER-VILLARS.
(23) MOHRMANN J. C. J. A tentative survey of water deficiencies in Europe and the need of (supplemental) irrigation ; comm. 6, *Ass. Int. Sc. du Sol,* Copenhague, 1958. p. 25.
(24) MOHRMANN J. C. J. et KESSLER J. 1959. Waterdeficiencies in European agriculture, 1 vol. Wageningen (*Int. Inst. for land reclamation and improvement*).
(25) PANABOKKE C. R. Juil-Sept. 1959. Water consumption of crops in the dry zone environment. Tropical Agriculturist (Ceylan), p. 187-194.
(26) PEGUY Ch. P. Précis de climatologie, 1 vol. Masson — Paris 1961.
(27) PENMAN H. L. 1948. Evaporation. in nature *The Physic Soc. Rep. on Progress in Physics,* **11**, p. 366-388.
(28) ROCHE M. Mai 1958, Etat actuel des études d'évaporation en Afrique Noire Française. (E. D. F. — O. R. S. T. O. M.)
(29) SALLES A. 1882. Expériences sur l'évaporation faites à Arles pendant les années 1876- 1882. *Bull. Comm. Mét. des B. du Rh.*, p. 81.
(30) STORK C. Nov 1959. Evapotranspiration problems in Iraq *Neth J. Agric. Sci,* Vol. 7, nº 4, p. 269-282.
(31) TAMM O. 1956. L'évapotranspiration dans la région forestière de la Suède. *VI^e Cong. Int. de l'Assoc. Int. Sc., Sol,* Paris.
(32) TAMM O. 1959. Studier över klimatets humiditet i Sverige *Kongl. Skogshögskolans Skrifter,* nº 32.
(33) TURC L. 1951. Nouvelle formule pour le calcul du bilan de l'eau en fonction des valeurs annuelles moyennes des précipitations et de la température. *C. R. Acad. Sc.*, **233**, p. 633.
(34) TURC L. 1953. Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement Paris, 1 vol. *Ann. Agr.* 1954, p. 491-595 et 1955, p. 5-131.
(35) TURC L. Sept. 1956. Besoins en eau des vergers. *Bull. Techn. Inf. Ing. Serv. Agr.* nº 113, p. 541.

ANNEXE I

TABLEAUX DES VALEURS DE Ig_A ET DE H (DURÉE DU JOUR, DU LEVER AU COUCHER DU SOLEIL).

Les valeurs astronomiques Ig_A et H ne dépendent que de l'époque de l'année et de la latitude ; elles sont indiquées ici de 10 en 10 degrés, pour les latitudes intermédiaires il suffit d'interpoler linéairement.

Valeurs mensuelles de Ig_A en petites calories par cm² de surface horizontale et par jour

Latitude Nord	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
Janvier	858	759	642	508	364	222	87,5	5	0
Février	888	821	732	624	495	360	215	82	2,9
Mars.......	890	873	834	764	673	562	432	289	146
Avril	862	894	902	880	833	764	676	577	508
Mai........	816	885	930	950	944	920	880	860	889
Juin	790	873	934	972	985	983	970	992	1 042
Juillet	804	879	930	955	958	938	908	905	945
Août	833	880	902	891	858	800	728	651	610
Septembre..	875	872	843	788	710	607	487	341	215
Octobre	880	830	755	658	536	404	262	119	17,5
Novembre ..	860	767	656	528	390	246	111	17	0
Décembre ..	842	735	610	469	323	180	55,5	0	0

Latitude Sud	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janvier	858	893	986	1 009	1 010	990	961
Février	888	888	937	923	887	820	738
Mars.......	890	872	845	783	697	590	466
Avril	862	820	726	629	507	376	235
Mai........	816	754	616	495	364	226	96
Juin	790	724	571	439	303	167	49,5
Juillet	804	748	597	473	338	205	78,5
Août	833	804	691	586	460	330	189
Septembre..	875	871	808	734	639	527	397
Octobre	880	896	905	880	830	753	657
Novembre ..	860	900	971	987	977	949	905
Décembre ..	842	891	992	1 031	1 045	1 040	1 025

Les valeurs de Ig_A sont copiées dans MAURAIN et dans BRUNT ; elles ont été calculées d'après les tables d'ANGOT en admettant comme valeur moyenne de la constante solaire : 1,94 petites calories par cm² et par minute ; c'est pour ces valeurs

de Ig_A qu'a été ajustée la formule en 0,18 + 0,62 h/H, pour d'autres valeurs les termes 0,18 et 0,62 seraient à corriger.

Durée astronomique du jour
Valeurs mensuelles moyennes en heures par jour

Latitude Nord	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janv. (31)	12,10	11,62	11,09	10,45	9,71	8,58	6,78
Fév. (28 1/4)	12,10	11,80	11,49	11,09	10,64	10,07	9,11
Mars (31)	12,10	12,08	12,04	12,00	11,96	11,90	11,81
Avril (30)	12,10	12,35	12,60	12,90	13,26	13,77	14,61
Mai (31)	12,10	12,59	13,11	13,71	14,39	15,46	17,18
Juin (30)	12,10	12,70	13,33	14,07	14,96	16,33	18,73
Juillet (31)	12,10	12,64	13,24	13,85	14,68	15,86	17,97
Août (31)	12,10	12,44	12,80	13,21	13,72	14,49	15,58
Septembre (30)	12,10	12,18	12,26	12,36	12,46	12,63	12,89
Octobre (31)	12,10	11,90	11,70	11,45	11,15	10,77	10,14
Novembre (30)	12,10	11,69	11,19	10,67	10,00	9,08	7,58
Décembre (31)	12,10	11,51	10,91	10,23	9,39	8,15	6,30

Latitude Sud	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Janvier (31)	12,10	12,64	13,24	13,84	14,64	15,82	17,87
Février (28 1/4)	12,10	12,39	12,73	13,13	13,62	14,31	15,38
Mars (31)	12,10	12,16	12,22	12,26	12,34	12,46	12,64
Avril (30)	12,10	11,90	11,63	11,33	11,03	10,62	9,91
Mai (31)	12,10	11,68	11,18	10,62	9,95	9,00	7,44
Juin (30)	12,10	11,51	10,91	10,25	9,38	8,15	6,01
Juillet (31)	12,10	11,60	11,06	10,40	9,64	8,50	6,63
Août (31)	12,10	11,80	11,47	11,07	10,56	9,92	8,88
Septembre (30)	12,10	12,06	11,99	11,91	11,83	11,74	11,55
Octobre (31)	12,10	12,30	12,53	12,83	13,14	13,57	14,33
Novembre (30)	12,10	12,57	13,07	13,64	14,32	15,34	17,01
Décembre (31)	12,10	12,70	13,30	14,06	14,94	16,28	18,70

Les valeurs H sont copiées dans GORCZYNSKI (v. Bibliographie de l'Annexe 3, réf. 10).

ANNEXE 2

Données météorologiques

Voici les données météorologiques utilisées pour les calculs dont les résultats ont été indiqués dans le mémoire (5e partie) ; deux exemples de calcul sont traités plus loin (voir Tunis et Dujailah).

Copenhague :

	t	Ig (Black)		t	Ig (Black)
Janvier	0,5	45	Juillet	17,1	450
Février	0	90	Août	16	335
Mars	2,1	180	Septembre	12,7	250
Avril	6	310	Octobre	8,5	130
Mai	11,3	425	Novembre	4,1	60
Juin	14,8	480	Décembre	1,7	30

Valentia :

	t	h (heures/jour)		t	h (heures/jour)
Août 1952	15,3	4,7	Février 1953	7,3	3,2
Septembre 1952	12,3	5,05	Mars 1953	7,5	5,25
Octobre 1952	11,2	3,1	Avril 1953	8,15	6,5
Novembre 1952	7,95	2,1	Mai 1953	12	6,6
Décembre 1952	7,4	1,45	Juin 1953	12,6	6,
Janvier 1953	7,3	1,65	Juillet 1953	14,8	5,7

Ouled Gnaou (Maroc) :

	t	Ig (Black)	h. r. (p. 100)		t	Ig (Black)	h. r. (p. 100)
Janv. 53	12,7	310	sup. à 50	Fév. 55	13,4	345	sup. à 50
Fév. 53	13,3	345	— do —	Mars 55	12,8	445	— do —
Mars 53	15,3	445	— do —	Avr. 55	18,9	525	— do —
Avr. 53	17,7	525	— do —	Mai 55	25,2	575	43,7
Mai 53	23	575	43	Juin 55	25,7	615	44,5
				Juil. 55	27,5	675	47,8
Août 54	28	600	42	Août 55	28,4	600	47,2
Sept. 54	26,2	520	40,2	Sept. 55	26,1	520	48
Oct. 54	22,8	400	47	Oct. 55	20	400	sup. à 50
				Nov. 55	16,4	305	— do —
Janv. 55	12,9	310	sup. à 50				

Soueilah (Maroc) :

	t	Ig (Black)	h. r. (p. 100)
Janv. 1955	13	300	sup. à 50
Fév. 55	14,7	350	— do —
Mars 55	14,05	450	49
Avril 55	19,9	525	42

Schouyaya (Maroc) :

	t	Ig (Black)		t	Ig (Black)
Fév. 1955	14,1	320	Juil. 1955	27,3	700
Mars 55	14,8	420	Août 55	26	600
Avril 55	16,3	520	Sept. 55	24,25	490
Mai 55	22	575	Oct. 55	20,5	375
Juin 55	23,8	650			

Tunis :

	t	h (heures/mois)		t	h (heures/mois)
Janv.	10,4	161	Juil.	26	391
Fév.	11,3	169	Août	26,4	357
Mars	13,1	215	Sept.	24,5	273
Avril	15,6	262	Oct.	20	233
Mai	19	307	Nov.	15,2	186
Juin	23,2	343	Déc.	11,3	152

exemple de calcul : pour avril, l' « annexe 1 » indique à cette latitude $H = 13{,}15$ par jour $\times$ 30 = 394, $Ig_A = 847$ nous calculons donc : $Ig = 847\ (0{,}18 + 0{,}62 \times 262/394) = 500$ d'où

$$ETp = 0{,}40 \frac{15{,}6}{15{,}6 + 15} (500 + 50) = 112 \text{ mm}$$

Dujailah (Iraq, données de Kut el Hai) :

	t	h/H	h. r. (p. 100)		t	h/H	h. r. (p. 100)
				Juil. 57	34,3	0,99	25
Août 56	35,7	0,89	25	Août 57	34,3	0,99	27
Sept. 56	31,7	0,94	26	Sept. 57	32	0,98	27
Janv. 57	9	0,58	sup. à 50	Janv. 58	11,2	0,54	sup. à 50
Fév. 57	12,6	0,65	sup. à 50	Fév. 58	12,2	0,80	sup. à 50
Mars 57	17,3	0,50	— d° —	Mars 58	19,4	0,71	43
				Avril 58	25,1	0,61	38

On peut être étonné des valeurs élevées atteintes par l'insolation relative pendant l'été 1957.

exemple de calcul : pour Août 1956, l' « annexe 1 » indique $Ig_A = 885$ nous calculons $Ig = 885\ (0{,}18 + 0{,}62 \times 0{,}89) = 646$ et, comme *h. r.* est inférieur à 50 p. 100 :

$$ETp = 0{,}40 \frac{35{,}7}{35{,}7 + 15} (646 + 50) \left(1 + \frac{50 - 25}{70}\right)$$
$$= 196\ (1 + 0{,}36) = 196 + 70 = 266$$

Environs du lac Tchad :

A titre d'exemple voici des données de Fort-Lamy :

	t	h/H	h. r. (p. 100)		t	h/H	h. r. (p. 100)
Janv.	23,7	0,81	30	Juil.	28,3	0,46	sup. à 50
Fév.	25,6	0,78	26	Août	26,5	0,44	— d° —
Mars	29,3	0,57	25	Sept.	27,7	0,56	— d° —
Avril	32,3	0,65	27	Oct.	29,3	0,71	— d° —
Mai	32,4	0,61	38	Nov.	27,1	0,82	40
Juin	30,8	0,55	sup. à 50	Déc.	24,5	0,78	37

la somme des 12 valeurs mensuelles calculées avec ces données est égale à environ 1895 mm (1640 + 255).

Franceville :

	t	h (heures/mois)		t	h (heures/mois)
Janv.	24,8	156	Juil.	24,3	102
Fév.	24,9	125	Août	23,7	110
Mars	25,2	131	Sept.	24,5	138
Avril	25,4	149	Oct.	24,5	144
Mai	24,9	142	Nov.	24,6	139
Juin	23,4	103	Déc.	24,6	144

Congo :

Voici deux exemples annuels :

	Yangambi 1957		Musasa 1958	
	t	h/H	t	h/H
Janv.	24,3	0,515	22,1	0,525
Fév.	24,9	0,605	21,8	0,485
Mars	25,1	0,440	22,1	0,445
Avril	25,3	0,545	22,3	0,600
Mai	25,2	0,465	21,1	0,560
Juin	25	0,475	19,8	0,635
Juil.	24,7	0,415	19,6	0,690
Août	24,2	0,445	21,6	0,675
Sept.	24,6	0,470	23,2	0,725
Oct.	24,2	0,455	23,3	0,620
Nov.	24,9	0,495	22,9	0,440
Déc.	24,4	0,440	21,9	0,355

Ceylan (dry zone) :

	t	h (heures/jour)		t	h (heures/jour)
Oct.	27	5,99	Avril	28	8,82
Nov.	26	6,39	Mai	28,5	9,04
Déc.	25	5,48			
Janv.	24,5	7,23			

ANNEXE 3

COMPLÉMENTS AU SUJET DE L'ÉVALUATION DE LA RADIATION GLOBALE

On a vu dans la 3e *partie* comment nous évaluons la radiation globale en fonction de l'insolation relative (h/H), ou à la rigueur en fonction de l'ennuagement ; on a vu aussi que les cartes de BUDYKO et celles de BLACK sont satisfaisantes et d'un emploi très commode.

Nous allons justifier ici l'emploi de la formule indiquée dans la 3e partie : $Ig = Ig_A\ (0{,}18 + 0{,}62\ h/H)$.

C'est une variante de la formule de PENMAN (11) :
$Ig = Ig_A\ (0{,}18 + 0{,}55\ h/H)$, qui avait été établie pour l'Angleterre en s'inspirant d'une formule d'ANGSTRÖM. Plus récemment PENMAN a légèrement modifié la formule qui devient : $Ig = Ig_A\ (0{,}20 + 0{,}48\ h/H)$ (12).

Pour la France nous avons d'abord employé la première formule de PENMAN, mais elle donnait (comme la seconde) des valeurs trop faibles pour les 3 stations où elle peut être éprouvée (stations où Ig et h ont été mesurés pendant des années : Versailles, St-Maur, Nice) ; les écarts sont d'environ 8 p. 100 ; ce désaccord provient vraisemblablement de différences climatiques (fréquence des nuages lumineux en France ?) ; on pourrait aussi incriminer la façon d'évaluer h et Ig dans les deux pays, quant aux valeurs de Ig_A utilisées par PENMAN, ce sont à très peu près les mêmes que celles que nous utilisons (v. Annexe 1).

Nous avons donc adopté de nouvelles constantes pour la formule de PENMAN, après avoir confronté les valeurs mensuelles moyennes de Ig et de h dans un certain nombre de stations situées pour la plupart en Europe, en Amérique, et en Afrique.

Méthode employée

Nous avons essayé d'ajuster une formule $Ig = Ig_A\ (a + b\ h/H)$ qui peut s'écrire : $Ig/Ig_A = a + b\ h/H$.

Si on considère les valeurs de Ig, Ig_A, h, H, pour les 12 mois de la même station « s », on constate qu'en général il existe une corrélation linéaire très étroite entre les valeurs mensuelles Ig/Ig_A et les valeurs mensuelles h/H. Si on établit la régression linéaire de Ig/Ig_A en h/H, on obtient pour a et b des valeurs numériques a_s et b_s. On peut alors calculer 12 valeurs $(Ig/Ig_A)'$ qui sont les 12 valeurs mensuelles $a_s + b_s\ h/H$; on constate que non seulement la moyenne des 12 valeurs $(Ig/Ig_A)'$ est égale à la moyenne des 12 valeurs observées Ig/Ig_A, et que pour chaque mois la valeur $(Ig/Ig_A)'$ est une bonne évaluation de Ig/Ig_A, mais aussi que la moyenne des 12 valeurs calculées pour Ig : $(Ig/Ig_A)' \times Ig_A$ est très voisine de la moyenne des 12 valeurs observées de Ig, et que les valeurs mensuelles calculées pour Ig sont de bonnes évaluations des valeurs mensuelles observées. Les valeurs a_s et b_s définies ici conduisent d'ailleurs souvent à des évaluations acceptables de Ig pour d'autres stations.

Ces constatations nous permettent d'employer la méthode suivante : pour ajuster une formule $Ig = Ig_A (a + b\ h/H)$ dans laquelle a et b sont les deux constantes à déterminer, nous établissons la régression linéaire de Ig/Ig_A en h/H : $Ig/Ig_A = a + b\ h/H$.

Calculs de régressions.

Nous avons utilisé les valeurs mensuelles de Ig et de h mesurées à Versailles (Station Centrale de Bioclimatologie) de 1936 à 1958, les valeurs mensuelles normales indiquées pour St-Maur dans « Résumé mensuel des observations faites au Parc St-Maur », les moyennes mensuelles de Ig à Nice entre 1931 et 1939 publiées par Gorczinski (10, p. 218).

Les calculs de régression donnent les valeurs suivantes aux termes a et b :

avec les 12 valeurs mensuelles moyennes (1936-1958) de Versailles, $a = 0{,}21$ $b = 0{,}54$; avec les moyennes de 1936-1943, 1944-1951, 1952-1958, on obtient respectivement $a = 0{,}219$ $b = 0{,}538$, $a = 0{,}225$ $b = 0{,}499$, $a = 0{,}182$ $b = 0{,}609$.

pour St-Maur on obtient $a = 0{,}17$ $b = 0{,}64$; on a corrigé les valeurs de h pour retrouver autant que possible celles que donnerait l'appareil de Campbell-Stokes qui n'est plus utilisé à St-Maur depuis 1952 (les valeurs de h sont mesurées sur l'enregistrement pyrhéliographique pour un seuil inférieur à celui de l'héliographe Campbell) ; avec les normales indiquées en 1950, avant l'abandon de l'héliographe, on trouve $a = 0{,}18$ $b = 0{,}65$.

pour Nice $a = 0{,}175$ $b = 0{,}65$; étant donné que pour différents sites de Nice et des environs les valeurs de h sont différentes on rencontre ici une difficulté : choisir des h valables pour le lieu où les mesures de Ig ont été faites ; nous avons fait le calcul de régression avec h de l'aérodrome, les h de Masséna et de Montgros donneraient des valeurs de a peu différentes et des valeurs de b atteignant 0,68.

En groupant Versailles, St-Maur, et Nice, on obtient 36 valeurs mensuelles normales pour chacune des 2 variables (12 valeurs par station), le calcul de la régression donne alors $a = 0{,}174$ $b = 0{,}643$.

On a examiné ensuite les données d'un certain nombre de stations européennes assez voisines les unes des autres (environ 500 km d'est en ouest et 170 du nord au sud) :

Rothamsted (normales publiées dans : Rep. Rothamsted Exp. Stat., 1959, p. 33) ; Wageningen (de Vries : 7) ; Gembloux et Uccle (Calembert : 5, Dogniaux : 8), les moyennes de Uccle pour la période 1949-1953 ont été écartées en raison de leur caractère très aberrant, on a pris les moyennes évaluées pour 1901-1930 ; Burscheid, près de Cologne (Berg : 1).

On constate que, à insolations relatives égales, les valeurs Ig/Ig_A pour ces stations sont nettement inférieur à celles que l'on observe en France ; le calcul de la régression linéaire pour l'ensemble des 5 stations (12 points mensuels par station, soit 60 points au total) donne $a = 0{,}143$ $b = 0{,}627$; signalons qu'à Burscheid les mesures de Ig ont été faites avec un solarigraphe de Robitzsch. On a écarté Davos (Prohaska : 13), car cette station d'altitude assez élevée donne des résultats très différents des autres : à valeurs égales de h/H, les Ig/Ig_A sont supérieurs à ceux des 3 stations françaises (remarquons qu'à des altitudes très élevées Ig doit approcher de Ig_A lorsque h/H est proche de 1).

Les stations africaines de Tamanrasset (Dubief : 9) et de Dakar (Salvador : 14 ; Monsieur Sudreau nous a communiqué les valeurs de h) sont, elles, en bon accord avec la formule des stations françaises.

Les stations indonésiennes de Bandung et Djakarta (Dee et Reesinck : 6) et de Tjibodas (Berlage : 2, Schmidt : 15, Braak : 4) donnent $a = 0{,}223$ $b = 0{,}456$, après correction des insolations relatives, car les valeurs publiées se rapportent à une partie de la journée seulement : de 7 h. à 17 h., parfois de 8 à 16 h.

Gorczynski (10) indique des radiations globales avec les insolations relatives correspondantes pour 10 stations U. S. A. et 18 stations d'autres pays (surtout européens). Les durées d'insolation considérées par Gorczynski comportent les corrections de début et de fin de jour ; c'est au contraire en fonction de h non corrigé que nous faisons l'ajustement, car cette grandeur semble plus apte à donner une corrélation étroite avec la radiation globale ; en conséquence nous avons fait subir le cas échéant aux valeurs qu'il indique les corrections opposées à celles qu'il a fait subir à des valeurs publiées par les auteurs européens.

Dans l'ouvrage de Gorczynski les valeurs ne sont pas données par mois, mais par saison seulement (4 couples de valeurs par station) ; nous avons vérifié que si l'on fait le calcul de régression sur plusieurs stations à la fois, c'est-à-dire avec un nombre de points assez élevé (12 ou 16 par exemple), on obtient des valeurs de a et b peu différentes de celles que l'on obtiendrait avec 12 couples de valeurs mensuelles par station ; il se peut que le calcul avec les valeurs saisonnières évalue b avec un excès de 0,01 ; on prend pour Ig_A et H les valeurs moyennes pour les trimestres considérés. On obtient :

pour Paris, Nice, et Montpellier, $a = 0{,}19$ $b = 0{,}63$ ou 0,62 après correction pour passer des saisons aux mois.

pour 6 stations européennes : 3 polonaises, 2 scandinaves, une anglaise, $a = 0{,}18$ $b = 0{,}64$, ou 0,63 après correction. (signalons que cette régression conduit à calculer pour la station anglaise, Londres, des valeurs de Ig excessives).

L'ensemble des 15 stations étrangères aux U. S. A. et à la France donne : $a = 0{,}20$ $b = 0{,}625$ (ou 0,615).

Pour 4 stations du nord des U. S. A.,	$a = 0{,}10$	$b = 0{,}72$ ou 0,71.
Pour 6 stations du sud des U. S. A.,	$a = 0{,}32$	$b = 0{,}30$ ou 0,29.
Pour les 10 stations des U. S. A.,	$a = 0{,}24$	$b = 0{,}49$ ou 0,48.
Pour les 28 stations ($= 3 + 15 + 10$) :	$a = 0{,}22$	$b = 0{,}56$ ou 0,55.

Examen des résultats

Les valeurs trouvées pour a et b sont dispersées. En fait, étant donné que pour une même station les valeurs de h/H, du moins les valeurs mensuelles normales, ne s'étagent pas de 0 à 1 mais dans un intervalle plus restreint, des évaluations presque aussi satisfaisantes de Ig en fonction de Ig_A et h/H peuvent être données par différents couples a, b, l'augmentation d'un de ces deux termes compensant la diminution de l'autre.

Les valeurs que nous avons adoptées : $a = 0{,}18$ et $b = 0{,}62$ sont non seulement particulièrement ajustées sur les Ig/Ig_A et h/H dont nous disposions pour la France, mais elles semblent convenir aussi bien pour Tamanrasset et Dakar ; elles ont été éprouvées favorablement pour d'autres stations africaines (v. « Bull. trim. du Rayon-

nement » Weather Bureau of South Africa) ; lesd onnées indiquées par Gorczynski s'accordent aussi avec la formule $Ig = Ig_A \times (0{,}18 + 0{,}62\ h/H)$ et il semble que d'autres valeurs de *a* et *b* ne donneraient pas de résultats bien meilleurs non seulement pour l'ensemble des 18 stations extérieures aux U. S. A., mais même pour l'ensemble des 10 stations des U. S. A.

Par contre, pour la région londonnienne, la Belgique, les Pays-Bas, la formule que nous utilisons donne à Ig des valeurs calculées excessives (de 8 p. 100 environ) ; il se peut que pour Java on obtienne un écart de même sens, plus faible semble-t-il. Les mesures faites dans ces pays s'accordent avec les valeurs de *a* et *b* proposées par Penman.

Signalons que Black, Bonython et Prescott (3) ont proposé la formule $Ig = Ig_A\ (0{,}23 + 0{,}48\ h/H)$ mais ces auteurs s'étaient astreints à utiliser les valeurs de *h* telles qu'on les trouve dans la littérature, quels que soient la méthode de mesure et le principe de l'évaluation ; ainsi plus de la moitié des valeurs qu'ils ont utilisées pour calculer leur régression linéaire comporte la correction de début et de la fin de jour, ou des corrections à peu près équivalentes (U. S. A., Java,), ce qui pourrait expliquer les écarts entre leur formule et celle que nous utilisons ; on remarque que pour les 5 stations proches de la Mer du Nord pour lesquelles on obtient des valeurs trop élevées de Ig avec $a = 0{,}18$ et $b = 0{,}62$, les résultats ne sont pas meilleurs avec les valeurs de *a* et *b* indiquées par ces auteurs.

Répartition des écarts entre Ig mesuré et Ig calculé.

Voici quelques précisions sur les résultats donnés par $Ig = Ig_A\ (0{,}18 + 0{,}62\ h/H)$:

pour les 28 stations indiquées par Gorczynski, si on compare les 112 valeurs saisonnières observées aux valeurs calculées, on constate que :

27 valeurs sont supérieures à $1{,}1 \times Ig_A\ (0{,}18 + 0{,}62\ h/H)$;

17 sont inférieures à $0{,}9 \times Ig_A\ (0{,}18 + 0{,}62\ h/H)$;

Si, tenant compte du fait qu'il s'agit de valeurs saisonnières et non mensuelles, on fait la comparaison en remplaçant 0,62 *h*/H par 0,63 *h*/H, on obtient 25 au lieu de 27 et 19 au lieu de 17.

Les 2/3 des valeurs de Ig ont donc des écarts avec les valeurs calculées correspondantes inférieurs à 10 p. 100 ; ajoutons que cet accord se manifeste pour les faibles valeurs de *h*/H (pour *h*/H inférieur à 0,25, 5 valeurs sur 12 sont dans l'intervalle, les autres, situées de part et d'autre, sont voisines) et pour les fortes (pour *h*/H supérieur à 0,65, 8 valeurs sur 9 sont dans l'intervalle), comme pour les *h*/H intermédiaires.

Pour Rothamsted, Wageningen, Gembloux, Uccle, Burscheid, sur 60 mois (12 par station), 22 ont des valeurs mesurées de Ig inférieures à $0{,}9 \times Ig_A\ (0{,}18 + 0{,}62\ h/H)$, aucune valeur mesurée de Ig n'est supérieure à $1{,}1 \times Ig_A\ (0{,}18 + 0{,}62\ h/H)$.

Pour Versailles, St-Maur, Nice, Tamanrasset, Dakar, sur 60 mois, un seul a un écart dépassant 10 p. 100 entre Ig mesuré et Ig calculé (cet écart est de 11 p. 100). Il semble que pour Alger l'accord serait aussi bon.

Dans tout ce qui précède on n'a considéré que 12 valeurs mensuelles (ou 4 valeurs saisonnières) de *h* et de Ig par station, c'était en général des valeurs *normales*, ou au moins des moyennes calculées sur plusieurs années. Nous avons appliqué la formule à des *données réelles*, mois par mois pendant 23 ans pour Versailles (Centre

National de Recherches Agronomiques, Station Centrale de Bioclimatologie) : la formule traduit bien la variation de Ig, pour un mois de rang donné, d'une année à l'autre. Alors que pour les 12 valeurs mensuelles normales on trouve des écarts de 0 à 5 p. 100 et pour la somme annuelle un écart inférieur à 1 p. 100, sur environ 270 valeurs mensuelles mesurées de I*g* (quelques mois sont manquants), 35 sont supérieures aux 11/10 de Ig_A (0,18 + 0,62 h/H) et 34 sont inférieures aux 9/10 de cette valeur ; le nuage des I*g* va de 50 à 550 petites calories par cm² et par jour ; sur les 69 écarts supérieurs à 10 p. 100, 27 sont relatifs à des mois pour lesquels I*g* est inférieur à 100 (décembre et janvier), les écarts absolus correspondants sont donc faibles ; les 3/4 des écarts sont inférieurs à 10 p. 100.

Conclusion.

La formule destinée à évaluer I*g* en fonction de *h* est indiquée dans la 3ᵉ partie du mémoire, avec toutes les précisions utiles pour son emploi. On a vu ensuite que les valeurs de I*g* ainsi évaluées ont permis de conduire les calculs de ETp de façon satisfaisante.

Dans cet « appendice 3 » nous avons étudié l'accord entre ces $Ig = f(h)$ et les I*g* mesurés ; la formule $Ig = Ig_A\ (0{,}18 + 0{,}62\ h/H)$ est convenable, compte tenu de la documentation actuellement disponible sur les mesures de I*g* et sur celles de *h* qui comportent encore les unes et les autres une marge importante d'erreurs ou d'incertitudes. On peut espérer que le développement et l'amélioration de ces mesures conduiront bientôt à une connaissance plus précise du climat solaire, les mesures de radiation globale restant l'affaire de spécialistes, et celles de durée d'insolation permettant d'évaluer la radiation globale dans des stations moins bien équipées, après une étude précise des relations entre ces deux grandeurs (rappelons que, tout en *mesurant* la durée d'insolation avec un héliographe, il serait utile qu'on adopte une *définition* basée sur des mesures pyrhéliométriques comme le préconise DOGNIAUX). On projette d'exécuter de tels programmes en France, en Belgique, etc... Aux U. S. A., où HAMON et ses collaborateurs ont établi des abaques pour évaluer I*g* en fonction de *h*, la radiation globale est mesurée dans de nombreuses stations et la « Monthly Weather Review » publie maintenant chaque mois une carte d'isolignes de I*g*, nous n'avons donc déjà plus besoin pour ce pays de nous reporter à une formule $Ig = f(h)$.

Remarque au sujet de l'emploi des cartes de BLACK ou de BUDYKO.

On a vu que les valeurs de I*g* lues sur les cartes de BLACK nous ont permis en général de calculer des ETp presque aussi valables que les valeurs de I*g* données par la formule $Ig = Ig_A\ (0{,}18 + 0{,}62\ h/H)$; il faut signaler certaines insuffisances de ces cartes, bien que l'incidence de ces insuffisances sur les évaluations de ETp soit faible la plupart du temps :

1° Les cartes ne donnent que des valeurs normales alors que la formule en h/H donne les valeurs de chacune des années pour lesquelles on dispose de mesures de *h*.

2° les cartes sont tracées à très petite échelle si bien qu'elles ne traduisent que les conditions d'insolation qui dominent sur de grandes surfaces ; elles ignorent les climats locaux, c'est ainsi que pour la « zone sèche » de Ceylan, elles indiquent en été des valeurs de I*g* probablement beaucoup trop faibles, car la « saison sèche » règne

sur cette zone pendant que les pluies de la mousson d'été dominent sur la plus grande partie de la péninsule Indienne.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES DE L'ANNEXE 3

(1) BERG 1949. Die Globalstrahlung in W. Deutschl. *Ann Met.*, **2**, 30.
(2) BERLAGE. 1948. Recording radiation... *Kon. Mag. Met. Obs. Verh.*, Batavia, 34.
(3) BLACK J. N., BONYTHON C. W. et PRESCOTT J. A. 1954. Solar rad. and the durat. of sunshine *Quat. J. Roy. Met. Soc.*, p. 231-235.
(4) BRAAK. Climat des Indes Néerlandaises vol. 1. *Kon. Mag. Met. Obs. Verh.*, Batavia 8.
(5) CALEMBERT J. 1954. *Bull. Inst. Agr. Stat. Rech. Gembloux*, p. 199-201.
(6) DEE et REESINCK. 1951 *Med. Landb. Wageningen*, **51**, p. 167-173.
(7) DE VRIES D. A. Solar Radiat. at Wageningen. *Med. Landb., deel* **55**, Verh. 6, p. 277-304.
(8) DOGNIAUX R. 1954. Et. du clim. de la rad. en Belgique I. R. M. B. *Contrib.*, n° 18, voir aussi NICOLET M. et DOGNIAUX R. 1951. I. R. M. B. Contrib,. n° 2, et Mémoires vol XLVII, 1951.
(9) DUBIEF J. 1959. Le climat du Sahara, t. **1**, Alger.
(10) GORCZYNSKI. 1945. Compar. of the climate of the U. S. and Europe, 1 vol. Polish Inst of Arts and Science in America, New-York, voir aussi BROOKS, C. F. et E. S., Sunshine recorders : a comparative study of the burning glass and thermometric systems, *J. Meteor*,. **4**, p. 105-115, 1957.
(11) PENMAN H. L. 1948. Natural evap. from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. A*, **193**, p.124
(12) PENMAN H. L. 1954. Evap. over parts of Europe A. I. H. S., Rome, t. **3**, p. 170.
(13) PROHASKA F. 1943. Die Globalstrahl. in Davos *Gerl. Beitr. Geoph.*, **59**, p. 247.
(14) SALVADOR O. Etude du rayonnement — Bilan radiatif à Dakar — Faculté des Sciences (Dakar) Colloque de la Recherche Scientifique, Abidjan-Dakar.
(15) SCHMIDT. 1950. Djawatan Met. dan Geof., *Djakarta, Verh.* **40**.

RÉSUMÉ

a) Des études antérieures sur l'évaporation en milieu non irrigué (bassins de cours d'eau et cases lysimétriques) nous ont permis d'ajuster des formules pour évaluer cette évaporation en fonction principalement de grandeurs météorologiques : ce sont les formules I, II, III. La formule III est la plus complète ; établie pour le calcul de l'évaporation du sol et de la végétation par 10 jours, elle fait intervenir, en plus des grandeurs météorologiques, des termes qui traduisent certains caractères de la végétation et du sol (ces termes sont assez faciles à évaluer car en général on n'a pas besoin de les connaître avec précision) ; elle bénéficie des connaissances sur le bilan de l'eau obtenues avec des cases lysimétriques situées sous des climats divers, et de confirmations par les bilans de bassins versants naturels d'Europe, des U. S. A., d'Afrique, d'Indonésie. Cette formule III peut être appli-, quée aux cas où le sol est bien couvert par une végétation active et abondamment pourvue en eau, elle permet alors d'évaluer « l'évapotranspiration potentielle » : ETp.

b) Nous utilisons maintenant ces formules pour évaluer l'évaporation des sols nus, des cultures non irriguées, des milieux naturels. Pour les cultures irriguées, par contre, nous avons simplifié le calcul ; dans ce cas en effet on peut simplifier la formule III puisque l'approvisionnement en eau et le développement de la végétation n'interviennent plus comme facteurs limitants ; cette simplification fait l'objet du présent mémoire.

On note t la température moyenne de l'air sous abri pendant la période considérée (en °C) et Ig la radiation globale en petites calories par cm² de surface horizontale et par jour pendant la même période.

La formule III, lorsqu'on l'applique au calcul de l'évapotranspiration potentielle, prend deux formes différentes selon que

$$l = \frac{(t + 2)\sqrt{Ig}}{16}$$

est supérieur ou inférieur à 10 (voir référence 34) ; chacune de ces formes se simplifie aisément, ainsi dans le premier cas (l supérieur à 10) on obtient fréquemment des valeurs de ETp proches de Emm/10 jours $= \frac{(t + 2)\sqrt{Ig}}{11}$, dans le second cas ($l$ inférieur à 10) ETp décadaire est souvent proche de $\frac{(t + 2)\sqrt{Ig}}{16}$; on pourrait donner des approximations plus poussées pour chacun des deux cas, mais l'expression

$$\text{ETp mm/10 jours} = 0{,}13 \frac{t}{t + 15} (Ig + 50)$$

suffit à elle seule, elle donne, lorsque $l > 10$ comme lorsque $l < 10$, des valeurs proches de celles obtenues avec l'ancien calcul ; dans les cas où il apparait quelques désaccords entre l'ancienne formule et la nouvelle, c'est que celle-ci s'accorde mieux avec les résultats expérimentaux, en effet la radiation globale, I*g*, tient dans la nouvelle formule une place plus importante que dans l'ancienne (sauf lorsque I*g* est faible), cette amélioration est devenue opportune depuis que les valeurs de I*g* sont mieux connues.

c) Exécution des calculs : on a défini plus haut (*b*) les variables *t* et I*g* en précisant dans quelles unités elles sont exprimées.

« h. r. » est l'humidité relative *moyenne pendant un mois*, exprimée en p. p. 100 ; plus précisément c'est l'humidité relative calculée à partir de la pression partielle moyenne de vapeur d'eau pendant ce mois, et de la moyenne mensuelle de la température de l'air sous abri.

Si h. r. > 50, on peut calculer ETp soit par décade soit par mois :

$$\text{ETp mm/10 jours} = 0{,}13 \frac{t}{t + 15}(\text{I}g + 50)$$

$$\text{ETp mm/mois} = 0{,}40 \frac{t}{t + 15}(\text{I}g + 50)$$

sauf pour le mois de février pour lequel on remplace 0,40 par 0,37 ; lorsque *t* est inférieur à 0°C on prend ETp = 0

Si h. r. < 50, on exécute le calcul par mois avec la formule suivante :

$$\text{ETp mm/mois} = 0{,}40 \frac{t}{t + 15}(\text{I}g + 50)\left(1 + \frac{50 - \text{h. r.}}{70}\right)$$

(0,37 pour février)

en général « h. r. » intervient faiblement dans le résultat du calcul.

Si I*g* n'est pas mesuré : 1° on peut lire sa valeur sur les cartes de BLACK (référence 3) ou sur celles de BUDYKO (référence 6) ;

2° Lorsque la durée d'insolation est connue, nous évaluons I*g* par la formule : $\text{I}g = \text{I}g\text{A}\ (0{,}18 + 0{,}62\ h/\text{H})$ (cf. annexe 3).

Les valeurs de I*g*A sont données dans l'annexe 1, ainsi que celles de H ; *h* est la durée d'insolation, mesurée en principe à l'héliographe CAMPBELL ; elle *ne comporte pas* la correction de début et de fin de jour (« low sun correction » des auteurs américains) ; *h* et H sont exprimés dans les mêmes unités, *h*/H est l'insolation relative.

d) exemples et résultats :

Deux exemples de calcul sont traités dans l'annexe 2, l'un à Tunis et l'autre à Dujailah (Iraq). Cet annexe donne les valeurs de *t*, I*g* (ou *h*, ou *h*/H), h. r., utilisées pour les calculs dont les résultats sont donnés dans la 5e partie du mémoire. Dans cette 5e partie la formule est éprouvée pour des stations de climats très différents, aux différentes époques de l'année ; on confronte les valeurs calculées avec les valeurs observées par les expérimentateurs ; le dernier paragraphe contient un tableau général qui résume les résultats, et le graphique représentatif ; les ETp s'échelonnent depuis 10 mm par mois au Danemark, en période hivernale, jusqu'à 250 mm par mois en Iraq, en période estivale.

e) conclusion :

La grandeur ETp que nous cherchons à évaluer est plus ou moins bien définie selon les climats ; c'est l'évapotranspiration d'un périmètre irrigué (cette irrigation étant suffisante pour satisfaire largement les besoins de la culture) pendant les périodes où la végétation est active et couvre le sol, c'est-à-dire à l'exclusion des périodes de germination où le sol est encore nu en grande partie, et à l'exclusion des périodes où la végétation est presque morte (céréales après la maturité par exemple).

La formule proposée ici est très simple et les variables utilisées sont généralement faciles à obtenir. La formule a été éprouvée pour des climats très différents, c'est pourquoi on peut admettre avec une grande confiance qu'elle donne des évaluations de ETp avec une erreur inférieure à 15 p. 100 plus de une fois sur deux (près de deux fois sur trois) pour un mois, et plus de deux sur trois (environ trois fois sur quatre) pour des périodes de plusieurs mois ; de tels résultats sont obtenus même lorsqu'on se contente pour la variable I*g* des valeurs lues sur les cartes de BLACK ou de BUDYKO.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 51-63.

551. 573 : 63,

SIGNIFICATION ET PORTÉE AGRONOMIQUE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

R. J. BOUCHET

Station centrale de Bioclimatologie, Centre national de Recherches agronomiques, Versailles.

Les études récentes sur la dynamique de l'eau dans le sol et dans les végétaux font de plus en plus intervenir la notion d'évapotranspiration potentielle ETP comme agent moteur de cette circulation. Nous nous proposons de préciser quelques aspects de ce concept relativement nouveau en essayant de mieux le définir et en tentant d'en dégager l'intérêt scientifique et la portée agronomique. Étant donné la complexité des facteurs qui interviennent, les raisonnements seront obligatoirement schématiques.

I. — DÉTERMINATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE (ETP).

On admet généralement que l'évapotranspiration potentielle correspond à la perte d'eau totale en phase gazeuse d'un couvert végétal abondant, largement alimenté en eau. L'évapotranspiration potentielle comprend donc les transpirations cuticulaires et stomatiques du végétal et l'évaporation du sol. L'évapotranspiration potentielle dépendrait uniquement des facteurs climatiques et serait indépendant du type de végétal. Elle définirait l'évapotranspiration maximale sous un climat donné. Cette évapotranspiration potentielle est habituellement mesurée avec des évapotranspiromètres ou calculée à partir de formules climatiques préalablement testées sur ces données expérimentales.

Une comparaison des données fournies par quelques formules climatiques et de celles déterminées à partir des évapotranspiromètres situés à Versailles (1), durant trois ans, figure dans le tableau 1 (2). Il en ressort deux points essentiels :

(1) 4 évapotranspiromètres type Thornthwaite de 4 m² avec plan d'eau constant à 60 cm ; sol maintenu au voisinage de la capacité de rétention par irrigations superficielles ; anneau de garde de quelques mètres. Les évapotranspiromètres sont situés dans une zone couverte de végétation dont l'évaporation réelle est assez voisine de ETP.

(2) L'évapotranspiration potentielle est exprimée en hauteur d'eau (en mm) comme les pluies. Dans le cours du texte on l'exprimera indifféremment en hauteur d'eau ou en énergie nécessaire par unité de surface pour évaporer cette hauteur d'eau. Ex. : 59,7 cal cm^{-2} à 0° pour 1 mm.

TABLEAU I

(1)	1958				1959				1960			
	Pen.	Thorn.	Turc	Evap.	Pen.	Thorn.	Turc	Evap.	Pen.	Thorn.	Turc	Evap.
Avril	58	38	51	70	53	51	58	77	54	52	69	51
Mai	82	82	84	91	79	83	97	87	89	83	105	87
Juin	89	94	91	80	100	100	122	121	99	108	113	106
Jnillet	96	115	106	72	106	128	128	145	100	99	101	82
Août	74	105	97	70	68	107	109	102	116	98	98	81
Septembre	49	84	87	50	58	79	109	92	56	67	82	51
Total	448	518	516	433	464	548	623	624	514	507	568	458

(1) Pen. : formule de Penman Thorn. : formule de Thornthwaite Turc. : formule de Turc
Evap. : évapotranspiromètre

1° L'évapotranspiration potentielle mesurée ETP varie notablement d'une année à l'autre. La fluctuation peut atteindre 50 p. 100 de la valeur minimale pour une période de six mois et dépasser 100 p. 100 à l'échelle du mois (ex. : 72 mm en juillet 1958, 145 mm en juillet 1959). ETP étant en corrélation négative avec les pluies, il en résulte des variations très importantes dans l'accroissement théorique du déficit en eau du sol (ex. : — 10 mm en juillet 1958, + 120 mm en juillet 1959). Les conséquences pour la végétation sont évidentes.

2° Les formules amortissent les fluctuations. Ainsi la formule de Thornthwaite, valable pour l'année normale, fournit des valeurs qui varient seulement de 10 p. 100 d'une année à l'autre dans le Bassin parisien. Si l'on compare les données observées et calculées, on constate que telle formule qui surestime ETP de 20 p. 100 durant un mois, la sous-estime de 20 p. 100 le mois suivant. On observe même des distorsions dans le sens des variations. Les résultats paraissent assez chaotiques (voir article de M. ROBELIN).

On peut donc raisonnablement s'interroger sur la valeur à attribuer tant aux formules climatiques qu'aux données dites expérimentales et peut-être également sur la signification même de l'évapotranspiration potentielle, puisqu'il ne semble pas possible d'atteindre celle-ci avec une précision suffisante.

Pour répondre à ces questions, il convient au préalable d'analyser les composantes du problème.

II. — ETP ET LES FACTEURS MÉTÉOROLOGIQUES

L'évaporation du point de vue physique est un phénomène énergétique puisque le passage d'un gramme d'eau de l'état liquide à l'état vapeur à 0° sous pression normale absorbe 597 calories. A l'échelle locale cette évaporation dépend des facteurs climatiques (rayonnement net, température de l'air, température du point de rosée,

turbulence) [1]. La plupart des formules climatiques utilisent ce déterminisme pour calculer l'évapotranspiration potentielle. On citera par exemple les formules de DALTON (1) ou leurs dérivées, de PENMAN (2), de TURC (3).

(1) $$ETP = C_n[F(\theta_a) - F(\theta_r)]$$

(2) $$ETP = \frac{F'(\theta)R_{net}}{F'(\theta) + \gamma} + \frac{\gamma E_a}{\gamma + F'(\theta)}$$

(3) $$ETP = (R_g + 50)\ 0{,}4\ \frac{\bar{\theta}_a}{\bar{\theta}_a + 15}$$

A une échelle de temps ou d'espace plus importante certains facteurs météorologiques, notamment θ_a et θ_r, résultent de l'action de l'évaporation sur le bilan énergétique au même titre que la radiation globale ou le rayonnement atmosphérique. On ne peut pas faire varier isolément un facteur. Ainsi une variation de 1°C de la température moyenne journalière, toutes autres conditions restant égales, entraînerait par l'intermédiaire de σT^4 une variation maximale du rayonnement net de 10 à 12 cal. cm^{-2} $jour^{-1}$. Cette modification de température de 1°C provoque une modification du déficit de saturation de l'air $(F(\theta_a) - F(\theta_r))$ et par suite une variation de l'évaporation. Selon les valeurs retenues pour le coefficient expérimental C_n (DALTON), on aurait à 18°C un changement dans la consommation d'énergie de l'ordre de 30 à 40 cal. cm^{-2} $jour^{-1}$. L'intensité des phénomènes d'évaporation joue donc un rôle essentiel dans l'interaction des données physiques, c'est-à-dire dans l'équilibre climatique qui se réalise.

Les facteurs météorologiques agissent tout à la fois comme cause et comme effet de l'évaporation. Cause quand on les considère sur le plan local, effet quand on les prend à une autre échelle, puisqu'ils se trouvent modifiés par cette évaporation. Ainsi, les conditions climatiques telles qu'elles sont mesurées sous abri demeurant les mêmes, une petite surface évaporante évaporera une quantité d'eau d'autant plus faible que l'évaporation dans son voisinage immédiat sera importante. En raison des transferts latéraux d'énergie on a une véritable action de proche en proche par l'intermédiaire de l'air. Ces « effets de bord » ou « effet d'oasis » sont valables à toutes les échelles où l'on considère les phénomènes. Ils présentent des inconvénients et des avantages pour l'étude de l'évapotranspiration. Inconvénient, car il n'est plus possible

[1] On utilisera dans le cours du texte les données suivantes :

θ_a, θ_r, températures de l'air et du point de rosée. $\bar{\theta}_a$ $\bar{\theta}_r$, moyennes des températures de l'air et du point de rosée pour le temps considéré.

γ, constante de Bowen.

$F(\theta)$, tension de vapeur saturante à la température θ.

$F_4(\theta) = \frac{d(F(\theta))}{d\theta}$.

C_n, coefficient expérimental.

a, albedo. p. 100 du rayonnement global réfléchi.

R_g, rayonnement global (rayonnement solaire direct, + rayonnement diffusé $\leqslant 5\mu$).

R_a, rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde $> 5\mu$.

$R_t = \sigma T^4$, rayonnement de la terre à la température absolue T avec une émissivité égale à l'unité.

$R_{net} = (1 - a)Rg + R_a - \sigma T^4$.

E, énergie mise en jeu par l'évaporation.

C, énergie mise en jeu par la condensation.

Q, énergie positive ou négative cédée au système air-sol-végétation durant 24 heures par conduction-convection de l'air et conduction du sol.

E_a, évaporation d'une surface d'eau libre ayant la température θ_a.

ETP, évapotranspiration potentielle.

ETR, évapotranspiration réelle.

de définir l'évaporation en un point particulier à partir de données climatiques prises à un niveau qui intègre une somme de points particuliers. Avantage, par contre, pour définir, à partir de ces mêmes données, l'évapotranspiration moyenne sur une surface importante comme la somme des évaporations locales. Ainsi la mesure de l'évapotranspiration potentielle n'aura un sens climatique que si l'on prend soin d'éliminer cette action latérale ou « effet d'oasis » parasite à l'échelle où l'on définit le climat.

Supposons une région uniforme au point de vue couverture végétale du sol et alimentation en eau. L'étude du bilan thermique portant sur 24 heures conduit à l'équation suivante [1]

$$(1 - a)\,R_g + R_a + C = E + R_t + Q \qquad (4)$$

Si les températures moyennes journalières sont identiques d'un jour à l'autre, Q représente à l'échelle de la journée les pertes par convection qui sont relativement faibles et en relation avec l'évaporation nette E-C.

$$(1 - a)\,R_g + R_a - R_t \neq E - C \qquad (5)$$

Le premier membre de l'équation (5) représente le rayonnement net, le second l'évaporation nette E-C. Lorsque E-C est maximale, c'est-à-dire atteint la valeur ETP, on a

$$R_{net} \neq ETP \qquad (6)$$

Le rayonnement net correspond sensiblement à ETP. Ainsi, par temps stable, en zone humide, en l'absence d'effet d'oasis, l'évapotranspiration potentielle a une signification météorologique. On verra ultérieurement que par l'intermédiaire du rayonnement net, ETP pourra être relié au rayonnement global absorbé $(1 - a)R_g$.

On notera que la formule de PENMAN considère l'évapotranspiration potentielle comme la somme de deux termes, l'un étant une fonction du rayonnement net, l'autre de l'énergie cédée par l'air. Ce second terme $\gamma E_a/\gamma + F'(\theta)$ représente un effet d'oasis local. Dans une région largement alimentée en eau, la somme des effets d'oasis locaux, considérés à l'échelle de l'abri météorologique, est nulle. Il existe une relation entre le terme du rayonnement net R_{net} et E_a. Comme nous proposons dans le cadre de nos hypothèses d'écrire $ETP = R_{net}$, cela revient à admettre que pour ces conditions très strictes le terme $E_a = R_{net}$.

En région désertique, l'évaporation est nulle $(E - C = O)$ et l'équation (5) donne $R_{net} \neq O$. L'évapotranspiration potentielle perd son sens météorologique et il devient impossible de relier ETP au rayonnement global. ETP ne peut plus se définir que par l'effet d'oasis qui dépend certes de facteurs météorologiques (θ_a, θ_r, vent), mais surtout des qualités propres de la végétation comme surface d'échange pour capter l'énergie de l'air et faire passer l'eau de l'état liquide à l'état vapeur. Dans la formule de PENMAN par exemple ETP deviendra presque exclusivement une fonction de E_a avec des coefficients expérimentaux qui varieront en fonction du rôle des surfaces d'échanges.

On remarquera qu'un évapotranspiromètre situé en zone désertique présentera des températures de surface plus faibles que la zone avoisinante, ce qui contribuera à modifier très localement σT^4 et par suite le rayonnement net. A ce sujet il est

[1] Cf. BOUCHET (R. J.). Évapotranspiration potentielle d'un couvert végétal : sa signification et sa mesure à partir de l'évaporation sous abri. *C. R. Acad. Sci.*, t. **251**, p. 1231-1233, 1960.

intéressant de noter qu'un facteur météorologique tel que le rayonnement net du sol à l'échelle de la journée peut être mis en relation avec l'activité végétale (production de matière sèche) par l'intermédiaire de l'évaporation nette E — C.

III. — ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE ET SURFACES D'ÉCHANGES.

Ayant examiné le sens météorologique que l'on peut donner à ETP notamment en zone humide, essayons de préciser sa signification énergétique en fonction du rôle joué par les surfaces d'échanges. On a souvent voulu réduire la plante à l'état d'une simple « mèche » intermédiaire entre l'air et le sol. L'énergie serait le seul facteur limitant de l'évapotranspiration potentielle dans le cas d'un abondant couvert végétal bien alimenté en eau. La définition devrait être moins sommaire.

En effet, même lorsque les conditions précédentes sont réalisées, on constate que l'humidité relative dans le couvert végétal reste souvent inférieure à 100 p.100. L'air peut donc encore fournir de l'énergie pour l'évaporation. Ce cas se rencontre dans la forêt équatoriale où les surfaces d'échanges sont pourtant très abondantes. Si nous plaçons une pastille d'évaporomètre dans cette forêt, elle évaporera une quantité d'eau qui ne sera pas nulle. L'augmentation de la surface d'échanges ainsi réalisée dans une région où ces surfaces sont déjà très importantes a mobilisé un peu d'énergie supplémentaire pour l'évaporation. Tout se passe, lorsque les surfaces d'échanges augmentent, comme si l'on approchait asymptotiquement d'une évapotranspiration potentielle absolue pour laquelle l'énergie serait réellement le seul facteur limitant.

L'étude que nous poursuivons sur le bilan thermique au voisinage du sol (travaux non publiés) montre qu'à la limite lorsque les surfaces d'échanges tendent vers l'infini et que par corollaire l'humidité relative reste constamment à 100 p. 100, l'évapotranspiration potentielle E — C correspond au terme $R_a - \sigma T^4$.

(7) $$E - C = R_a - \sigma T^4 \quad \text{(avec surfaces d'échanges infinies)}$$

On déduit de l'équation (4)

(8) $$(1 - a)\, R_g - Q = 2\, (E - C = 2\, ETP$$

d'où lorsque $Q = O$

(9) $$ETP = 0{,}5\, (1 - a)\, R_g$$

L'évapotranspiration potentielle absolue que l'on vient de définir comme étant celle correspondant à l'énergie seul facteur limitant serait donc égale, en l'absence d'effet d'oasis, à la moitié de la radiation globale absorbée par un vaste couvert végétal.

La plupart des végétaux couvrant bien le sol et convenablement alimentés en eau présentent des surfaces d'échanges suffisantes pour leur permettre d'évaporer, en l'absence d'effet d'oasis, des quantités d'eau qui atteindraient à la limite la moitié du rayonnement global absorbé.

Ainsi l'évapotranspiration potentielle d'un point de vue physique peut valablement être considérée comme la limite supérieure de l'évapotranspiraton lorsque l'énergie devient l'unique facteur limitant. Cette évapotranspiration potentielle absolue est une valeur asymptotique qui en zone humide, donc en l'absence d'effet

d'oasis parasite, sera une fonction de la radiation globale R_g, facteur météorologique, et de l'albedo *a*, facteur dépendant du végétal. Selon l'importance des surfacee d'échanges du végétal, l'évapotranspiration potentielle se rapprochera plus ou moins de la valeur asymptotique $0,5\ (1 - a)R_g$.

On notera qu'une variation de 0,1 de l'albedo pour une région recevant une radiation de 500 cal. cm^{-2} $jour^{-1}$ correspond à une variation possible de l'évapotranspiration potentielle de 25 cal, c'est-à-dire de plus de 0,4 mm/jour. Les variations d'albedo en fonction du type de végétal, de sa physiologie, de l'état des surfaces mouillées ou non mouillées par exemple, ont donc des effets non négligeables.

L'importance des surfaces d'échanges qui approche ou éloigne l'évapotranspiration potentielle du végétal de sa valeur asymptotique va dépendre de nombreux facteurs. La surface développée du feuillage déterminera la valeur maximale des surfaces d'échanges, mais la régulation stomatique déterminera pour la plus grande part le « rendement » de chaque surface d'échanges-unité. Finalement les surfaces d'échanges vont dépendre non seulement de la morphologie du végétal, mais surtout de sa physiologie et de son alimentation en eau.

Ainsi l'analyse des facteurs qui commandent l'évapotranspiration potentielle conduit à cerner les limites de validité de cette notion. Il s'agit d'une donnée énergétique, caractérisant le climat, mais qui dépendra dans une certaine mesure du végétal par son albedo et ses surfaces d'échanges. En région humide et à température moyenne journalière constante, il correspond au rayonnement net et à la limite pourra correspondre à la moitié du rayonnement global absorbé par un vaste couvert végétal.

Cette notion de l'évapotranspiration potentielle que l'on cherche généralement à relier à des données climatiques prises sous abri météorologique n'est donc valable qu'à une échelle correspondant à celle de ces données. Il s'agit de l'échelle de la turbulence proprement dite dont on sait que l'échelle de temps varie de quelques secondes à quelques minutes. L'échelle des distances correspondante sera de l'ordre de quelques dizaines à quelques centaines de mètres (1). Du point de vue agronomique l'évapotranspiration potentielle ne peut donc se définir que comme l'évapotranspiration moyenne maximale sur une surface de l'ordre de quelques hectares.

Quelles conséquences devons-nous tirer de cette définition de l'évapotranspiration potentielle ?

En toute rigueur une mesure expérimentale ne sera valable que si la végétation utilisée n'entraîne pas d'effet d'oasis dans la région où l'on se propose de faire la mesure. Elle devra être en équilibre au point de vue énergétique avec cette région. Certes, l'albedo, la surface foliaire, la régulation stomatique de la végétation pourront être différents entre la zone étudiée et la zone de mesure. Mais par le jeu des compensations leur effet global devra être le même. Sinon les évapotranspiromètres devront être entourés d'un « anneau de garde » d'autant plus important que la région aura un caractère d'aridité marqué. En région très sèche la mesure ne pourra s'effectuer qu'au centre d'une zone de végétation de quelques hectares correctement alimentés en eau. Au centre d'une telle surface l'effet d'oasis serait réduit au maximum et n'affecterait pas encore les données climatiques mesurées sous abri. Un anneau de

(1) On définit habituellement en météorologie des échelles de turbulence qui permettent de négliger les phénomènes dont l'échelle est petite par rapport au mouvement macroscopique considéré. Ainsi on définit les échelles suivantes : moléculaire, 10^{-9} s ; turbulente, 1s à quelques minutes (distance max. quelques centaines de mètres) ; convection et mouvements associés, 10 minutes à 1 heure (distance quelques kilomètres) ; cyclonique, 3 à 4 jours (distance 1 000 à 2 000 km) ; planétaire, 10 à 30 jours (distance 5 000 à 10 000 km).

garde plus important commencerait par contre à modifier le climat à ce niveau et l'on ne mesurerait plus l'évapotranspiration potentielle correspondant au climat initial mais celle d'un nouveau climat. Il résulte de ces considérations que l'on ne peut atteindre que très difficilement ETP avec des surfaces d'échanges très différentes de celles qui caractérisent la région (ex. : gazon dans un désert ou dans la forêt équatoriale, plan d'eau des bacs colorado).

De même, on ne pourra pas étudier de relation entre ETP et l'évaporation d'un arbre isolé, ou d'une plante en pot même située au milieu d'une culture. Car malgré les phénomènes de compensation qui peuvent réduire les écarts, les relations trouvées ne peuvent pas avoir de caractère absolu et général. Elles resteront contingentes et limitées dans leur possibilité d'extension. On peut expliquer ainsi la multitude de coefficients expérimentaux trouvés dans la littérature pour relier l'évaporation observée dans des conditions plus ou moins ponctuelles à des données climatiques qui traduisent des phénomènes intervenant sur des surfaces beaucoup plus importantes.

Malgré les réserves que l'on vient de faire sur les mesures expérimentales et en les prenant en considération, on peut admettre que les évapotranspiromètres installés à Versailles donnent ETP avec une erreur relative qui, variable selon les années, peut atteindre 15 p. 100 à l'échelle du mois.

Les remarques faites au début du texte sur la fluctuation importante de ETP en zone tempérée restent valables et l'on doit admettre que si l'on considère généralement ETP comme assez constant pour un lieu et un mois donné, ceci semble dû à la très large utilisation de formules climatiques qui « tamponnent » systématiquement les fluctuations autour de la valeur moyenne. Il serait intéressant de mieux connaître ces variations de ETP, car elles peuvent contribuer à poser sous un jour nouveau la rentabilité des irrigations de complément en zone subhumide.

IV. — ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE ET RÉACTIONS DU VÉGÉTAL.

Après cet examen rapide de l'évapotranspiration potentielle sous l'angle physique ou météorologique, nous voudrions essayer de préciser l'intérêt de cette notion pour le chercheur ou l'agronome.

On examinera donc très schématiquement ce que peut apporter la connaissance de l'évapotranspiration potentielle pour la vie végétale. On sait que la production de matière sèche est liée à l'activité photosynthétique. Celle-ci dépend des échanges gazeux, c'est-à-dire pour une grande part de l'ouverture des stomates et se trouve ainsi relié à l'essentiel des phénomènes de transpiration. L'agriculteur recherche généralement la production maximale de matière sèche. Très sommairement, toutes autres conditions restant égales, cette exigence sera satisfaite quand le maximum de stomates seront ouverts au cours du temps. Ainsi lorsqu'un couvert végétal évapore une quantité d'eau correspondant à ETP, on peut admettre que les surfaces d'échanges, essentiellement stomatiques, ne sont pas un facteur limitant de l'évaporation. Dans ces conditions, la production de matière sèche ne pourrait être limitée que par des facteurs indépendants de la circulation de l'eau. Si par contre l'évaporation réelle du même couvert est inférieure, pour une raison quelconque, à ETP, ceci signifie que les surfaces d'échanges, par l'intermédiaire de la régulation stoma-

tique, se sont réduites. Les échanges gazeux peuvent devenir insuffisants et la plante ne se trouve plus dans les conditions optimales pour élaborer de la matière sèche. Ainsi on peut rattacher à la notion d'évapotranspiration potentielle la notion de production potentielle en matière sèche d'un végétal déterminé dans des conditions écologiques bien définies. La comparaison systématique de l'évapotranspiration réelle et de l'évapotranspiration potentielle devrait permettre de tester dans quelle mesure une culture utilise toutes les potentialités offertes par le climat (voir article de M. ROBELIN).

Mais la régulation stomatique qui, en dernière analyse, commandera les variations de surfaces d'échanges dépend, en dehors de l'intensité lumineuse, de la température, de la teneur en CO_2, de l'équilibre hydrique qui se réalise au niveau de la feuille entre les apports d'eau et les pertes d'eau par évaporation. Avec une inertie variable selon la plante considérée, on aura diminution ou suppression de la surface d'échange stomatique, lorsque l'évapotranspiration potentielle instantanée dépassera les possibilités globales d'alimentation de la plante en eau que nous désignerons par un débit q_{max} qui correspond à la transpiration réelle maximale. La définition des surfaces d'échanges dépendra finalement de deux données essentielles : d'une part le débit d'eau que peut assurer le végétal, d'autre part la valeur de l'évapotranspiration potentielle instantanée.

On peut essayer de représenter schématiquement le phénomène afin de mieux en saisir les multiples aspects et d'en tirer quelques hypothèses de travail. Sur la figure 1_a on a représenté l'évolution de la température de l'air et du point de rosée sous abri au cours d'une journée. Ces deux données climatiques définissent à chaque instant le déficit de saturation que l'on a porté sur la figure 1_b. Ce déficit de saturation traduit, en première approximation, le pouvoir évaporant instantané de l'air. En fait, selon l'intensité des phénomènes de rayonnement, selon la ventilation, les températures des surfaces évaporantes peuvent être supérieures, égales ou inférieures à celles de l'air. Cependant, en valeur relative au cours du temps, l'évolution de Δf traduit bien l'évolution plus ou moins parallèle de l'évapotranspiration potentielle instantanée. A un coefficient près, relativement constant, la courbe inférieure du graphique peut donc représenter la hauteur d'eau évaporable au cours de la journée. La plante, en fonction de sa morphologie, de son âge, peut assurer un certain débit d'eau q_{max}. Celui-ci dépendra également du volume de terre exploré par les racines fonctionnelles, de l'accroissement quotidien de ce volume, des caractéristiques hydrodynamiques de ce sol (point de flétrissement, densité) et évidemment de son humidité (voir les articles de M. HALLAIRE [1] et de MM. VERNET et CHAUSSAT).

Lorsque le débit q_{max} commandé par les variables que l'on vient d'énoncer sera supérieur à l'évapotranspiration potentielle maximale, la plante pourra garder durant toute la journée le maximum de surface d'échange. L'évapotranspiration réelle pourra suivre l'évapotranspiration potentielle et l'élaboration de matière sèche ne sera pas limitée par les conséquences d'un manque d'eau. Lorsque ETP dépasse q_{max}, soit parce que l'évapotranspiration potentielle est trop élevée, soit parce que q_{max} est limité par le développement radiculaire ou le dessèchement du sol, on aura déficit instantané au niveau de la feuille, intervention de la régulation stomatique, diminution des surfaces d'échange et par suite réduction des possibilités d'élaborer de la matière sèche.

[1] E_{TP} est relié au terme $\frac{dh}{dt}$ (voir l'article de M. HALLAIRE) qui commande la circulation de l'eau dans le sol, par l'intermédiaire de l'évapotranspiration réelle instantanée, c'est-à-dire du débit q.

Ainsi la position relative de ETP maximale et de q_{max} jouera un rôle essentiel pour permettre de savoir si la plante souffre d'un manque d'eau, c'est-à-dire si l'évapo-

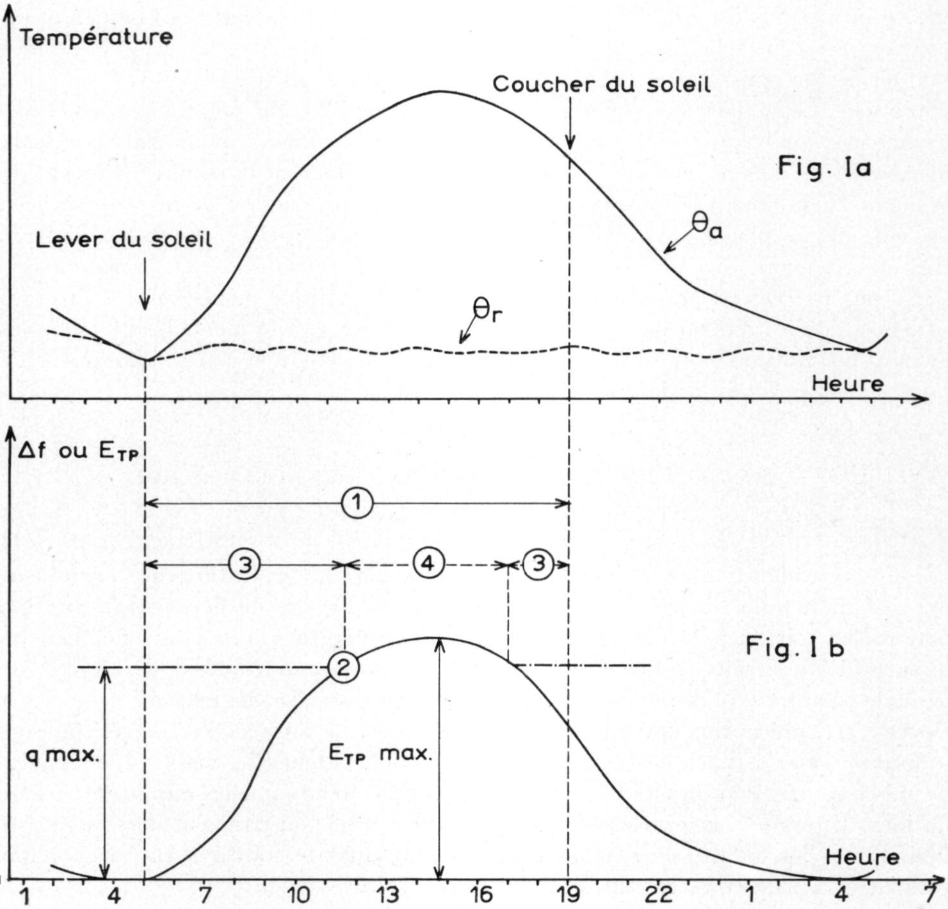


Fig. 1.

θ_a température de l'air.
θ_r température du point de rosée.
DF déficit de saturation $F(\theta_a) - F(\theta_r)$.
ETP évapotranspiration potentielle $C_n[F(\theta_a) - F(\theta_r)]$.
1 durée possible d'ouverture des stomates (phase diurne). Ex. : 14 heures.
2 diminution relative des surfaces d'échanges. Q_{max} = ETP.
3 durée pendant laquelle ETR = ETP. Surfaces d'échanges théoriquement non limitantes. Durée 8 h. 30.
4 durée pendant laquelle ETR $<$ ETP. Surfaces d'échanges théoriquement limitantes. Durée 5 h. 30.
Le schéma a été tracé à partir de la formule de M. Hallaire donnant les températures moyennes horaires diurnes et nocturnes à partir du minimum et du maximum quotidien (1).

transpiration réelle suit l'évapotranspiration potentielle et si corrélativement la plante est en état d'utiliser toutes les potentialités du milieu. Cette conception globale du problème doit être nuancée, surtout dans les régions à EPT très élevés.

On remarquera que certaines feuilles d'un même végétal peuvent être soumises

(1) Cf. M. Hallaire. « Les températures moyennes nocturnes, diurnes, nycthémérales exprimées en fonction du minimum et maximum journaliers de température. » *C. R. Acad. des Sc.* 1950, 231, p. 406-408.

à une évapotranspiration potentielle locale trop intense pour leur alimentation en eau et fermer leurs stomates. L'absence d'évaporation à ce niveau contribue à modifier la température de cette feuille et de l'air à son voisinage, permettant une évapotranspiration plus intense des feuilles d'un autre niveau. Une certaine compensation peut exister à l'échelle de la plante. Ainsi, même si les stomates de certaines feuilles sont fermés on pourra atteindre une évaporation approchant de l'évapotranspiration potentielle. Cependant, les différents niveaux du feuillage ne se trouvent pas dans les mêmes conditions écologiques, rayonnement notamment, pour élaborer de la matière sèche. Les phénomènes de compensation ne joueront donc pas forcément de la même façon pour l'évapotranspiration et pour la production de matière sèche à l'échelle de la plante quand l'évapotranspiration potentielle atteint des valeurs très élevées (voir les articles de M. ROBELIN et de M. DAMAGNEZ). On signalera que l'on a pu observer ces phénomènes de régulation stomatique même sur des luzernes situées sur des évapotranspiromètres au cours de l'été 1960 à Versailles, lorsque les évapotranspirations potentielles quotidiennes dépassaient une valeur journalière de l'ordre de 5 mm (voir article de M. DE PARCEVAUX).

V. — CONSÉQUENCES EN MATIÈRE D'EXPÉRIMENTATION ET DE PRODUCTION AGRICOLE.

Ces considérations sur l'évapotranspiration potentielle instantanée entraînent un certain nombre de conséquences, soit pour la mesure de l'évapotranspiration potentielle, soit au point de vue agronomique. Le végétal choisi pour effectuer des mesures d'évapotranspiration potentielle devra posséder une surface développée de feuillage d'autant plus importante que l'on sera dans des régions où celle-ci est élevée. Cette précaution devrait permettre de disposer de surfaces d'échanges toujours suffisantes pour s'approcher de l'évapotranspiration potentielle, même si les feuilles soumises aux ETP locales les plus élevées ne sont pas fonctionnelles durant une partie du jour. Il sera en outre prudent, par très belle journée ou par vent desséchant, de vérifier que les feuilles du végétal gardent leurs stomates ouverts afin de pouvoir connaître la valeur à accorder aux mesures effectuées.

Les conséquences agronomiques de la divergence entre l'évapotranspiration potentielle et l'évapotranspiration réelle à l'échelle de la journée mériteraient d'être étudiées systématiquement. Ainsi dans la région parisienne les calculs de bilans hydriques conduisent à estimer l'évapotranspiration réelle au mois de juillet comme variant selon les années entre 60 et 90 mm, alors que l'évapotranspiration potentielle fluctue entre 80 et 150 mm. Certes ceci peut être dû à une couverture végétale insuffisante à l'échelle géographique (les blés évaporent à cette date relativement peu), mais les sondages effectués dans des cultures en pleine croissance (betteraves, maïs, fourrages) montrent que l'on observe également pour celles-ci certains désaccords systématiques entre E_r et ETP. On doit donc admettre que les surfaces d'échanges présentées par la végétation sont soit insuffisantes, soit non fonctionnelles pendant des durées qui dépendent des lois de la régulation stomatique (voir article de M. de PARCEVAUX et bibliographie), mais qui doivent toujours être importantes et qui correspondent aux heures les plus chaudes et les plus lumineuses.

Ainsi l'utilisation par la plante des réserves en eau du sol lui permet certes

de se développer, mais ne lui permet plus de réaliser toutes ses potentialités en fonction du milieu quand il se crée un déséquilibre dans la circulation de l'eau. Ceci semble être la règle dans le Bassin parisien dont le niveau de production est déjà pourtant très élevé. On est en droit de supposer que la production agricole se trouve limitée à l'échelle géographique, du mois de mai au mois de septembre, par le déséquilibre existant à l'échelle de la journée entre ETP et E_r. Ce facteur jouerait même en année dite normale et se manifesterait très largement les années sèches, empêchant ainsi de connaître le véritable niveau écologique de production.

On devrait tendre à définir les débits q_{max} que peut assurer chaque espèce végétale en fonction des caractères hydrodynamiques du sol et de son humidité pour tenter de les placer autant que possible dans des conditions de milieu qui correspondent à $q_{max} \geqslant \mathrm{ETP}_{max}$.

Cet objectif pourrait être atteint de différentes façons nullement exclusives les unes des autres, en jouant sur le choix des sols, sur le développement radiculaire et évidemment en apportant de l'eau par irrigation (voir article de M. HALLAIRE).

Mais dans l'interprétation des essais d'irrigation on devra rester très prudent, car on ne considère généralement que la résultante de phénomènes dont on n'a fait qu'entrevoir la complexité. Ainsi on ne devra pas oublier que le déficit en eau au niveau de la plante se fait sentir durant des échelles de temps très courtes et que les bilans à l'échelle de la décade, voire du mois, peuvent les masquer totalement. Il est donc nécessaire de prendre certaines précautions. Un essai d'irrigation, même calculé en fonction de ETP suppose un temps plus ou moins long entre l'application des doses. Durant cette période le végétal utilise les réserves en eau du sol. Si les surfaces traitées sont petites (ex. $<$ 1 ha) et les évapotranspirations potentielles élevées, on ne réduira pas les effets d'oasis par l'irrigation et l'on pourra avoir des diminutions relatives des surfaces d'échanges. Dans ces conditions les conclusions tirées de l'essai concernant la consommation d'eau et le rendement matière sèche risquent d'être pessimistes par rapport à celles que l'on tirerait à partir d'essais portant sur des surfaces plus importantes. L'irrigation a pour effet non seulement d'augmenter considérablement q_{max}, mais également de diminuer ETP. Si l'on veut conduire des essais globaux sans chercher à analyser la part respective de ETP, de q_{max}, des surfaces d'échanges, on devra prendre soin d'opérer sur de vastes surfaces, de réduire les intervalles de temps entre l'application des doses et d'évaluer les rendements au centre des zones traitée, car les effets d'oasis peuvent contribuer à réduire en bordure l'évapotranspiration réelle du végétal par rapport à ETP local. Enfin, pour faciliter l'interprétation, il serait nécessaire de suivre le comportement du végétal en tant que surfaces d'échanges dans les jours qui suivent l'irrigation (voir article de M. de PARCEVAUX).

Si l'irrigation permet d'augmenter q_{max}, on peut également envisager de placer le végétal dans les conditions optimales en « écrêtant » les valeurs trop élevées de ETP. Dans les zones sèches, pour une même consommation d'eau, on améliorerait ainsi le rendement en matière sèche. (voir article de M. DAMAGNEZ). On a vu que cette diminution relative de ETP pouvait être obtenue en irrigant des vastes zones plutôt que de petites surfaces éparses sur lesquelles les effets d'oasis étaient maximaux.

Enfin, dans certaines régions, le vent constitue un des facteurs déterminant de l'évapotranspiration potentielle. Dans ces situations il serait nécessaire d'étudier et de développer l'emploi systématique des brise-vents. Leur action ne serait

pas envisagée sous l'angle mécanique, mais comme devant réduire l'évapotranspiration potentielle maximale. Les végétaux protégés pourraient garder le maximum de surfaces d'échanges et améliorer sensiblement leur production. L'influence des haies en pays de bocages mériterait également d'être examinée sous cet angle, car les prairies ne disposent généralement que de faibles disponibilités instantanées en eau et peuvent être très sensibles à des ETP même peu élevées. Une suppression trop systématique de ces brise-vents naturels pourrait contribuer à modifier par la suite le climat dans un sens défavorable à la production maximale de matière sèche.

CONCLUSION

On a vu que l'évapotranspiration potentielle avait une signification physique et même météorologique certaine, mais que d'une part la plante n'était pas absente de cette définition (albedo, surface d'échanges) et que d'autre part cette notion n'était accessible à la mesure que sur une échelle d'espace relativement importante (surface comprise entre l'hectare et quelques hectares). On a constaté qu'en région tempérée ETP pouvait fluctuer largement au même titre que les autres facteurs météorologiques. Il est apparu nécessaire de connaître ETP non à l'échelle du mois mais à celle de la journée pour étudier valablement le problème de la circulation de l'eau dans le végétal. On a constaté que même en région subhumide, comme le Bassin parisien, une certaine divergence se manifestait entre évapotranspiration réelle et évapotranspiration potentielle. Il en résulterait une limitation des possibilités d'élaborer de la matière sèche par les plantes. Ce facteur limitant de la production végétale en zone tempérée jouerait même en année dite normale et en année sèche il masquerait les potentialités de production dans des proportions qui seraient à déterminer.

On a proposé l'étude à l'échelle de la journée de ces phénomènes afin de mieux séparer l'action de ETP, de q_{max} et du rôle des surfaces d'échanges. Ceci afin de s'affranchir du nouveau facteur limitant d'ordre climatique que peut constituer ETP_{max}. Les solutions du problème pourraient porter soit sur une meilleure utilisation des réserves en eau du sol, soit sur les moyens de réduire ETP_{max} en diminuant notamment les effets d'oasis par des brise-vents, par une meilleure couverture végétale du sol ou par l'irrigation de vastes surfaces.

Ainsi l'étude de l'évapotranspiration potentielle, agent moteur de la circulation de l'eau, non plus seulement à l'échelle du mois, mais à l'échelle fine de la journée devrait permettre de mieux analyser les relations plante-climat-sol et surtout de mieux connaître leur interaction. Il devrait en résulter la possibilité de déterminer de nouvelles potentialités de production agricole tout en aboutissant à une meilleure « économie » de l'eau.

Reçu pour publication en novembre 1963.

RÉSUMÉ

L'analyse des paramètres qui interviennent dans la notion d'évapotranspiration potentielle (ETP) permet de dégager d'une part sa signification météorologique (rayonnement net en zone très humide, effet d'oasis en zone sèche, combinaison des deux termes en zone intermédiaire), d'autre part le rôle joué par la couverture végétale (albedo des surfaces d'échanges, régulation stomatique). Il en résulte que ETP en tant que facteur climatique n'est accessible à la mesure que sur une échelle d'espace relativement importante (surface de l'ordre de quelques hectares).

L'étude montre qu'à la notion de ETP on peut faire correspondre la notion de production potentielle de matière sèche pour un végétal déterminé placé dans des conditions écologiques définies. La comparaison de l'évapotranspiration réelle et de ETP doit permettre de tester dans quelle mesure une couverture végétale utilise toutes les potentialités du climat.

On a constaté qu'en région tempérée ETP pouvait fluctuer largement comme les autres facteurs météorologiques. Il est apparu nécessaire de connaître ETP non à l'échelle du mois mais à celle de la journée pour étudier valablement le problème de la circulation de l'eau dans le sol ou dans le végétal. On a remarqué que même en zone sub-humide et hautement productive comme le Bassin parisien, une certaine divergence se manifestait entre ETR et ETP. Il en résulterait une limitation des possibilités d'élaborer de la matière sèche par les plantes. Ce facteur limitant de la production végétale en zone tempérée jouerait même en année dite normale et en année sèche il masquerait les potentialités de production dans des proportions qui seraient à déterminer. Ainsi se pose sous un jour nouveau le problème des irrigations de complément.

On a proposé l'étude à l'échelle fine de la journée de ces phénomènes afin de mieux séparer l'action de ETP de l'évapotranspiration réelle maximale et du rôle des surfaces d'échanges (régulation stomatique et échanges gazeux). Ceci afin de s'affranchir du nouveau facteur limitant d'ordre climatique que peut constituer l'évapotranspiration potentielle maximale au cours de la journée. Les solutions du problème pourraient porter soit sur une meilleure utilisation des réserves en eau du sol, soit sur les moyens de réduire ETP max., en diminuant notamment les effets d'oasis par des brise-vents, par une meilleure couverture végétale du sol ou par l'irrigation de vastes surfaces.

Ainsi l'étude de l'évapotranspiration potentielle, agent moteur de la circulation de l'eau, non plus seulement à l'échelle du mois, mais à l'échelle fine de la journée, devrait permettre de mieux analyser les relations plante-climat-sol et surtout de mieux connaître leur interaction. Il devrait en résulter la possibilité de déterminer de nouvelles potentialités de production agricole tout en aboutissant à une meilleure « économie » de l'eau.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 65-73.

631. 67 : 631. 16

ÉLÉMENTS SUR LA RENTABILITÉ DE L'IRRIGATION

M. ROBELIN

Station d'Agronomie, Centre de Recherches agronomiques du Massif-Central, Clermont-Ferrand.

Lorsque l'on envisage l'aménagement d'une région naturelle en vue de l'irrigation, un certain nombre de problèmes se posent au technicien, dont le plus important concerne évidemment le bilan économique de l'opération.

Les dépenses sont en fonction du volume d'eau globale V à contrôler et du débit maximum v que l'on devra véhiculer. Ils sont calculés à partir de données physiques, locales, réunies dans l'équation :

$$V \text{ ou } v = E\,T\,P - P - S$$

où E T P représente soit le besoin global pendant le cycle de végétation, si l'on veut évaluer V, soit la consommation maximum pendant un intervalle de temps réduit si l'on veut calculer v.

P et S représentent les sources d'eau in situ, respectivement la Pluie et le Stock utilisable du sol.

Les recettes correspondent à l'augmentation de récolte $\triangle$ R consécutive au traitement.

La solution du problème repose donc en définitive sur la détermination de trois inconnues :

E T P
S
$\triangle$ R.

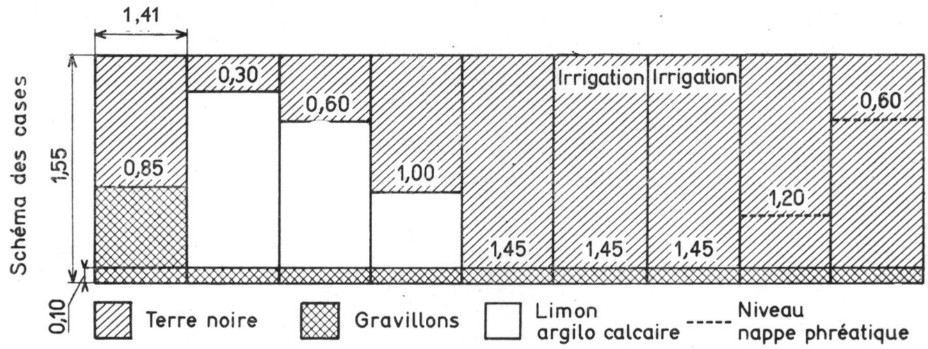
On trouvera dans ce numéro des exposés concernant l'évaluation d'E T P (Bouchet) et S (Hallaire). Quant à cette note, elle constitue un rappel de nos observations sur les rapports entre l'alimentation en eau et les rendements (1 — 2).

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

5 types de profils sont reconstitués en cases lysimétriques à partir de matériaux identiques : une terre noire, un « limon » de colluvionnement argilo-calcaire, des gravillons de rivière. Tous les profils ont une profondeur de 155 cm et diffèrent entre eux par l'épaisseur relative de chaque constituant. Un type de profil homogène (terre noire sur 145 cm) est reproduit 5 fois identiquement mais est différencié en 5 cas particuliers par l'établissement d'un plan d'eau à différentes profondeurs ou par des irrigations superficielles. L'ensemble du dispositif contient donc 9 traitements où sont contrôlés l'évapotranspiration globale pendant la période de végétation (ET_r) et les rendements. Chaque traitement est répété deux fois.

RÉSULTATS

TABLEAU I



					1955 — Betterave sucrière				
E Tv	343	399	405	425	431	484	—	519	546
R	113,8	143,5	160,2	176,0	168,1	215,8	—	244,9	196,0
racines	69,7	86,4	90,5	98,1	99,0	108,8	—	123,0	113,1
					1956 — Orge				
E Tv	337	337	337	337	337	356	—	404	389
R	92,7	81,2	92,9	92,6	96,6	122,3	—	140,3	113,5
grain	43,8	38,8	42,9	43,2	45,5	54,7	—	55,3	50,1
					1957 — Maïs INRA 244				
E Tv	217	257	255	281	274	293	290	315	354
R	56,2	87,4	91,0	94,4	95,2	110,2	106,7	126,6	107,8
grain	20,4	41,0	46,5	42,8	45,3	52,5	53,2	68,2	50,5
					1958 — Mélange Luzerne × Daxtyle				
E Tv	406	—	—	—	439	632	545	522	621
R	31,6	51,6	53,8	56,1	54,5	74,9	61,4	67,6	77,4
					1959 — Luzerne × Dactyle				
E Tv	588	666	666	666	666	1066	846	1000	1017
R	78,5	100,6	100,0	104,1	101,4	191,0	169,8	193,2	179,0
					1960 — Luzerne × Dactyle				
E Tv	635	648	648	648	648	981	813	910	892
R	198,8	110,5	119,2	119,2	116,8	180,5	152,8	174,5	163,5

— Évapotranspiration pendant la période de végétation.
ET_v en millimètres et Rendements R en quintaux de matière sèche à l'hectare suivant les différentes conditions de profil ou d'irrigation

Les évapotranspirations s'échelonnent, selon le volume d'eau disponible, depuis des valeurs que l'on peut considérer comme équivalentes à l'évapotranspiration potentielle E T P_v dans les conditions microclimatiques de l'essai, sur les cases à plan d'eau, jusqu'à des valeurs très faibles, en particulier lorsque l'horizon de gravillon est important. Le déficit peut alors atteindre 100 à 400 mm suivant l'année et la culture.

On peut remarquer :

1° que le « limon » argilo-calcaire, particulièrement graveleux, qui fut choisi, présente sensiblement les mêmes qualités que la terre noire en ce qui concerne le volume d'eau qu'il peut retenir et la possibilité d'utilisation de cette eau par les plantes.

2° que l'influence de la profondeur du plan d'eau sur l'évapotranspiration n'est pas très importante sauf en première année de luzerne. Le plan d'eau le plus proche de la surface donne des valeurs en moyenne plus élevées ; on attribue ce phénomène beaucoup plus à un effet d'oasis, particulièrement marqué dans ce dernier traitement placé à une extrémité du dispositif d'ensemble. C'est pourquoi on a choisi comme E T P_v les valeurs fournies par la case à plan d'eau plus profond (120 cm), avec une exception pour la première année de luzerne où manifestement cette nappe fut mal exploitée.

Les rendements en matière sèche récoltable reflètent la façon dont la plante a pu satisfaire l'évapotranspiration potentielle dans les conditions d'approvisionnement en eau où elle était placée. Il est peu probable que les qualités du profil, autres que son « potentiel hydrique », soient intervenues pour différencier aussi intensément les rendements. L'action du « potentiel chimique » a peut-être joué légèrement dans le cas de la terre noire la plus mince (30 cm, sur limon) car pour une évaporation sensiblement voisine les rendements sont un peu inférieurs à ceux des cases de type voisin possédant un horizon de terre noire plus épais. Dans l'étude ultérieure, nous avons cependant éliminé, pour les plantes autres que la luzerne, les résultats des cases à plan d'eau proche de la surface (60 cm) ; les céréales et la betterave sucrière accusent nettement l'anaérobiose partielle et la carence azotée imposées par ce milieu.

Covariation. — Elle est évidente à la simple lecture des chiffres. L'expression des corrélations existant entre évapotranspiration E T_v (mm) et matière sèche produite R (qx/ha) pendant le cycle végétatif complet des différentes cultures fournit les régressions (a. b, c, d, e, f,) réunies dans le tableau 2 (voir aussi le graphique 1).

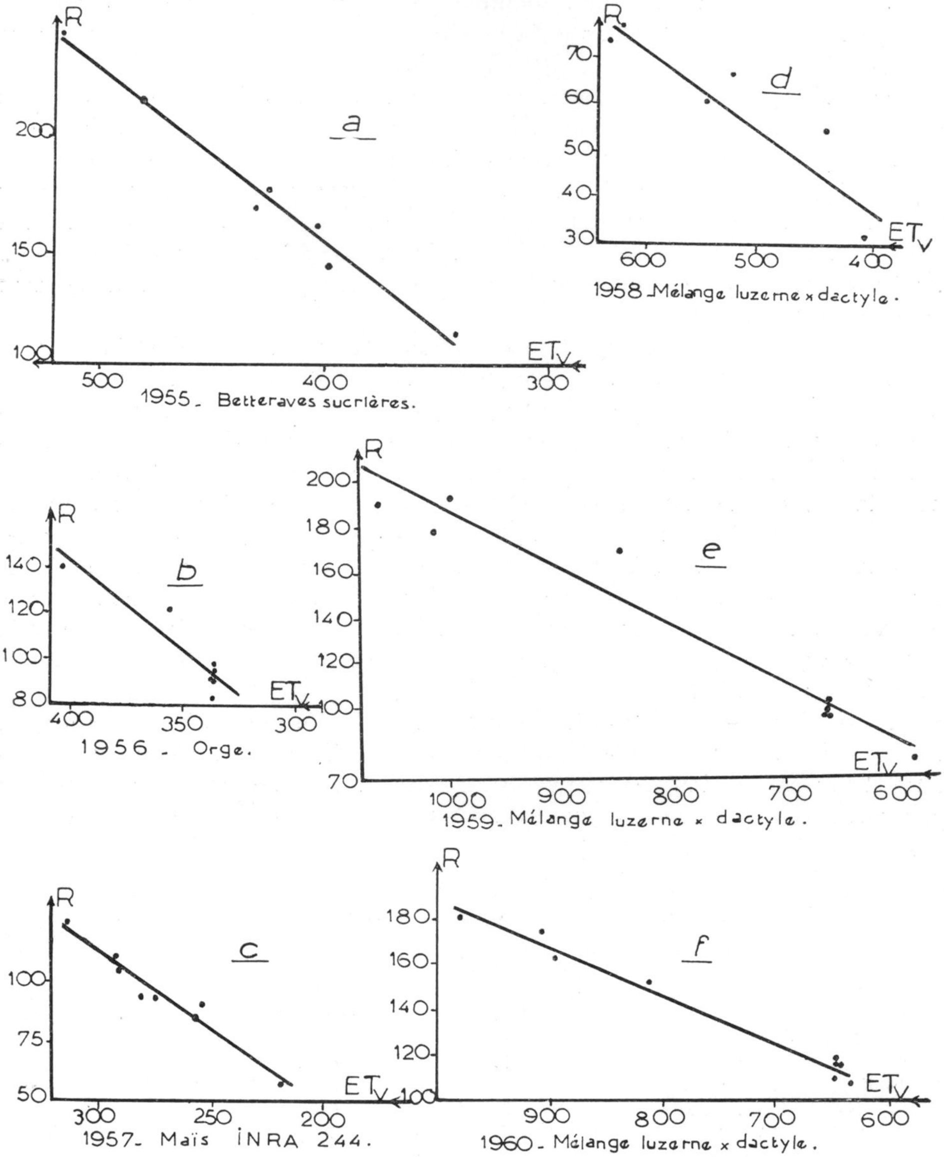
TABLEAU 2

	Régressions	r	n	p	ETP_v mm
a) 1955 — Betterave sucrière	$R = 0{,}755\ ET_v - 149{,}5$	+ 0,992	7	< 0,001	519
b) 1956 — Orge	$R = 0{,}785\ ET_v - 171{,}3$	+ 0,923	7	0,001 < p < 0,01	404
c) 1957 — Maïs INRA 244	$R = 0{,}670\ ET_v - 86{,}8$	+ 0,963	8	< 0,001	315
d) 1958 — Mélange Luzerne-Dactyle	$R = 0{,}173\ ET_v - 30{,}5$	+ 0,908	6	0,02 < p < 0,01	621
e) 1955 — Mélange Luzerne-Dactyle	$R = 0{,}255\ ET_v - 66{,}5$	+ 0,976	9	< 0,001	1000
f) 1960 — Mélange Luzerne-Dactyle	$R = 0{,}209\ ET_v - 20{,}6$	+ 0,992	9	< 0,001	910
g) 1959 — Maïs INRA 258	$R = 0{,}489\ ET_v - 94{,}4$	+ 1,00	3	< 0,001	524

Ces résultats d'ensemble ont été confirmés par une expérimentation de type classique portant sur l'irrigation à doses variables (g) fixées sur les données de l'évapotranspiration potentielle *mesurée* (3).

De cette première analyse il faut conclure :

1° que le coefficient moyen d'utilisation de l'eau pendant la durée de végétation considérée dans son ensemble est plus forte pour les plantes annuelles que pour le mélange fourrager (comparer a — b — c — g avec d — e — f).



Graphiques 1.

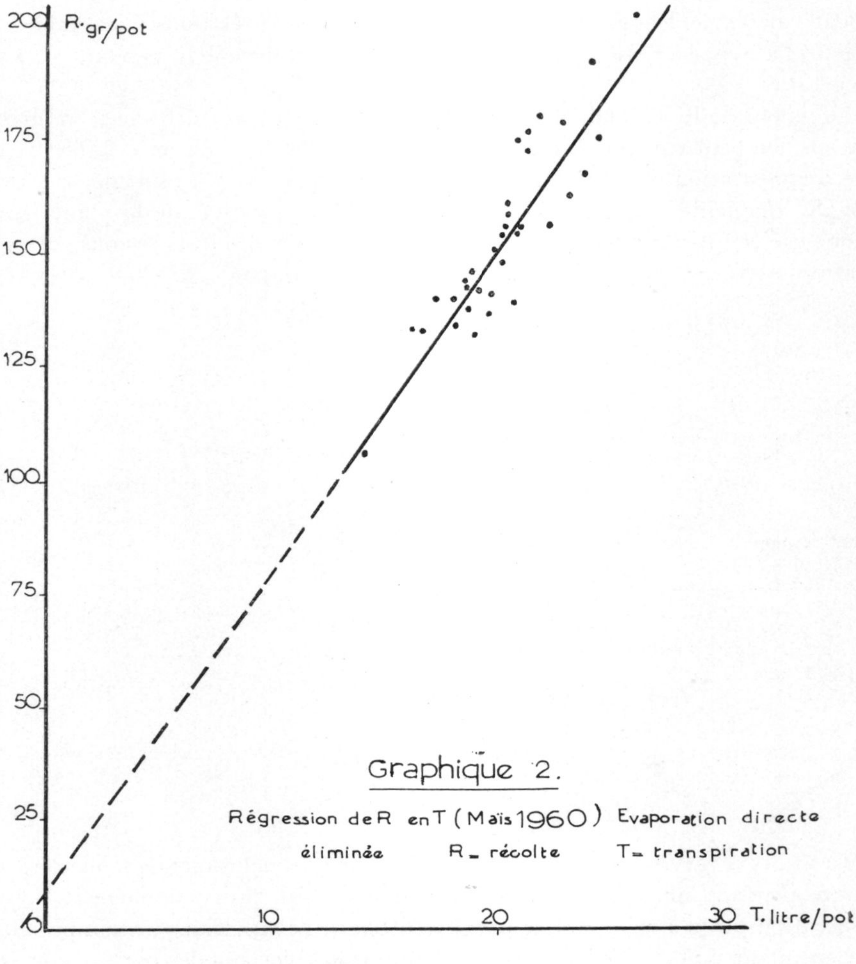
Corrélations entre rendement et évapotranspiration.

R = Matière sèche à 105° en qx/ha

ET_V = Evapotranspiration pendant la végétation en mm.

2° que ce coefficient est également plus élevé, pour un même végétal, lorsque l'évapotranspiration potentielle est plus faible (comparer c et g). L'eau utilisée en zone d'irrigation de complément doit être plus « efficace » qu'en zone aride où l'E T P est plus forte.

L'existence d'une ordonnée négative à l'origine peut s'interpréter au premier



Graphique 2.

Régression de R en T (Maïs 1960) Evaporation directe éliminée R = récolte T = transpiration

abord comme résultant d'une évaporation inefficace, assimilable à l'évaporation directe.

Une telle hypothèse est en accord avec le fait que la culture la plus couvrante, c'est-à-dire le mélange luzerne-dactyle, malgré des E T P_v plus élevées, fournit les ordonnées à l'origine les plus faibles en valeur absolue.

Nous en avons trouvé, d'autre part, une confirmation directe dans une expérience en pot où nous avons éliminé l'évaporation propre du sol par un film plastique. Toute l'eau passant dans l'atmosphère devait transiter obligatoirement par la

plante. L'application de différentes conditions de sécheresse nous a conduit, sur l'ensemble de la culture, à la corrélation suivante :

h) $R = 7{,}10\ T + 9{,}9$ $r = 0{,}897$ $n = 35$ $p < 0{,}001$
R = Matière sèche en gramme (Maïs).
T = transpiration en litre.

L'ordonnée à l'origine est négligeable en regard des valeurs de R (graphique 2). On peut valablement admettre que, dans le cadre des corrélations d'ensemble citées plus haut l'abscisse à l'origine représente l'évaporation directe E_v pendant la période de végétation.

La valeur de E_v dépend, entre autre, de la fréquence des arrosages naturels ou artificiels. On peut trouver ici une explication partielle de l'efficacité faible ou nulle d'une augmentation d'$E\ T_v$ ($\triangle$ E T) à la suite d'irrigation par aspersions. L'évaporation E_v augmente seule de $\triangle E = \triangle E\ T$, la transpiration de la plante restant stationnaire et satisfaisante. Cet effet apparaît dans nos résultats si nous comparons irrigation interne et irrigation superficielle. (tableau 3).

TABLEAU 3

		Irrigation superficielle 1 arrosage/semaine.	Irrigation interne (nappe)	Δ E mm	non irrigué	Efficacité du supplément d'évaporation Δ R / Δ E T	
						arrosage	irrigation interne.
1958	$E\ T_v$ mm	632	621	11	439	0,10	0,12
	R qx/ha	74,9	77,4		54,5		
1959	$E\ T_v$ mm	1 066	1 000	66	666	0,21	0,27
	R qx/ha	191,0	193,2		101,4		
1960	$E\ T_v$ mm	981	910	71	648	0,19	0,22
	R qx/ha	180,5	174,5		116,8		

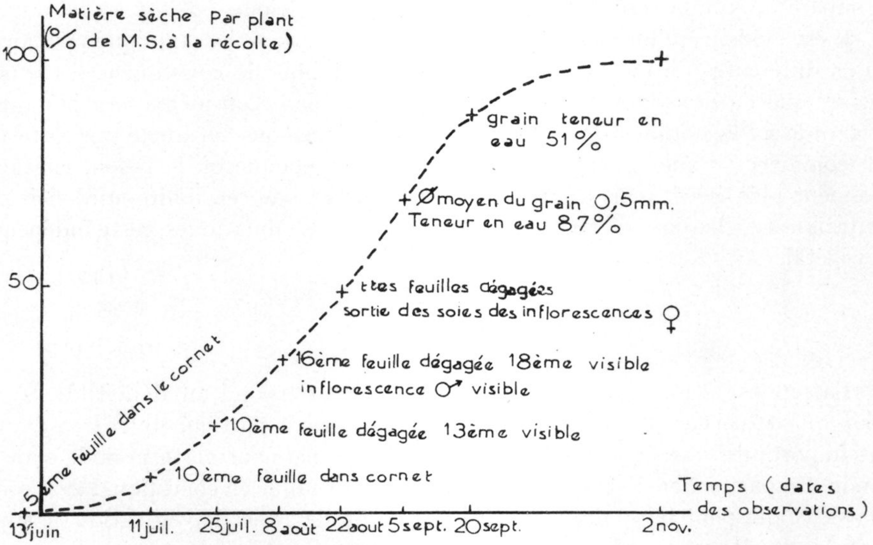
DISCUSSION

Des faits observés, on peut tirer brutalement la conclusion que la matière sèche produite pendant un cycle de végétation complet est proportionnelle à l'évapotranspiration jusqu'à ce que cette dernière atteigne l'évapotranspiration potentielle.

Cependant il ne s'agit ici que de régressions et, bien que les corrélations soient le plus souvent très hautement significatives, elles n'expliquent rien par elles-mêmes. Seule la connaissance précise des mécanismes d'action de la « sécheresse » permettrait d'établir les rapports exacts entre transpiration et photosynthèse. On peut supposer que la loi résultante comprendra un certain nombre de paramètres, en particulier un paramètre d'intensité du flux transpiratoire, intégrant les conditions climatiques, et un paramètre d'intensité de photosynthèse reflétant, pour un végétal donné, le stade de végétation.

Nous avons tenté d'analyser l'importance de ce dernier paramètre en appliquant des sécheresses comparables entre elles en valeurs relatives (exprimées en pourcen-

tage de la transpiration maximum) durant des périodes échelonnées tous les quinze jours au cours de la végétation d'un maïs. La courbe de croissance normale est représentée sur le graphique 3.



Graphique 3.

Courbe de croissance du Maïs (W 37A × W 153 R)

Matière sèche indice 100 = 204 grammes

Semis le 24 Mai.

Résultats (Tableau 4).

TABLEAU 4

Epoque du traitement	Matière sèche synthétisée normalement durant cette période ; en % de la matière sèche à la récolte	I Déficit de transpiration en % de la transpiration normale durant la période	II Déficit de matière sèche % de la matière sèche formée normalement durant la période	Répercussion de la sécheresse $= \frac{II}{I}$
11 au 15 juil....	11,3	46,8	52,7	1,15
25 juil. au 5 sept.	14,3	45,2	48,7	1,07
8 au 22 août....	15,7	36,4	29,7	0,82
22 août au 5 sept.	19,8	a) 48,6	43,0	0,89 } moy.
		b) 67,8	72,4	1,07 } 0,98
5 au 20 sept....	18,7	46,5	35,1	0,76
20 sept. au 2 nov.	12,3	35,6	49,5	1,35
8 août au 5 sept..	35,5	42,8	44,8	1,05

L'indice d'action de la sécheresse (dernière colonne du tableau 4) varie peu autour d'une valeur moyenne égale à l'unité. Dans notre essai ces différences ne sont pas significatives, et nous pouvons conclure provisoirement qu'à 10 p. 100 de déficit

de transpiration correspond approximativement une chute de 10 p. 100 de matière sèche formée, indépendemment des stades de végétation. Ce résultat n'est pas infirmé lorsque nous cherchons à prolonger le traitement dans le temps ; si nous appliquons les conditions de sécheresse du 8 août au 5 septembre, nous obtenons l'indice 1,05, à comparer aux indices 0,82 et 1,15 de chaque demi période.

Il est évident qu'un même déficit relatif de Transpiration appliqué pendant des phases différentes de la végétation aura d'autant plus de conséquences, *en valeur absolue*, que l'accroissement de poids pendant la phase considérée sera plus grand. On aborde ici la notion de période critique, qui, vue sous cet angle, ne correspond pas, comme l'indique AZZI, (4. p. 77 et 79) à une époque où le besoin en eau est forcément plus élevé, mais à une période de plus grande sensibilité au déficit d'alimentation. Le « besoin » d'eau, fonction des conditions climatiques, reste indépendant du végétal.

CONCLUSION

La réponse à un volume d'irrigation donné correspond au déficit de transpiration qu'elle permet de combler au cours d'une période particulière et sera d'autant plus importante que la vitesse de développement pendant cette période sera plus grande. En particulier si l'accroissement de poids est faible en condition d'évaporation intense, ce qui peut se produire en début et en fin de cycle de végétation, le supplément la récolte sera minime malgré une augmentation de transpiration importante.

Les régressions entre ET_v et Rendements présentées plus haut sont établies à partir de bilans globaux. Les déficits d'E T sont répartis de façon aléatoire pour chaque cas particulier et la corrélation caractérise un effet moyen qui ne peut apparaître qu'avec un nombre d'observations suffisant.

Le calcul de la rentabilité du réseau d'irrigation devrait tenir compte des corrélations de cet ordre ; alors que les préoccupations d'exploitation du réseau et d'économie d'eau sont susceptibles de faire intervenir, en second lieu, la notion de « période critique » telle qu'elle a été définie. Nous reviendrons ultérieurement sur cette idée mais dès maintenant on peut souligner qu'indépendemment du critère de vitesse d'accroissement de poids il existe vis-à-vis d'une production particulière, l'obtention de grains par exemple, des « sous-périodes » particulièrement importantes.

Reçu pour publication en novembre 1960.

RÉSUMÉ

L'auteur, s'appuyant sur sept essais expérimentaux conduits sur diverses plantes, montre que la production de matière sèche est liée à l'évapotranspiration (E. T. $_V$.) par des relations de la forme $R = a\ ET_V\text{-}b$ pour toute valeur de ET_V inférieure à l'evapotranspiration maximum ETP_V. Le terme b correspond en première approximation à l'évaporation directe de l'eau du sol ; la relation tend vers la forme $R = T_V$ si l'on mesure uniquement l'eau transpirée par la plante (T_V).

Ce fait est vérifié quelque soit le stade de développement.

Chaque élément du rendement global reste cependant soumis à des lois moins simples ; la réponse au déficit d'alimentation en eau est alors fonction de la phase de végétation durant laquelle apparaît la sécheresse.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1) COLLIER D., et ROBELIN M., 1959. Contribution à l'étude de la dynamique de l'eau et des substances chimiques dans les sols argilo-calcaires de Limagne. *Ann. Agr.* **4**, p. 415-453.

(2) ROBELIN M., 1960. Le bilan de l'eau sous climat Limagnais et ses répercussions agronomiques. *Bull AFES.* **8**, p. 395-401.

(3) *Travaux des Stations d'Agronomie.* p, 18 I, 1959.

(4) AZZI G. Ecologie Agricole. *Nouvelle Encyclopédie Agricole.*

Ann. agron., 1961, **12** (1), 75-80.

581. 116 : 578. 087

TESTS PHYSIOLOGIQUES PERMETTANT DE CONTROLER L'ALIMENTATION EN EAU DES PLANTES

S. de PARCEVAUX

Station centrale de Bioclimatologie, Centre national de Recherches agronomiques, Versailles.

INTRODUCTION

Jusqu'ici c'est surtout le rendement qui a été utilisé comme test de l'efficacité de l'irrigation. Pour mener à bien une irrigation rationnelle, il serait indispensable d'avoir des moyens de contrôle physiologiques plus fins, c'est-à-dire portant sur des périodes courtes (de l'ordre de la journée ou moins) et non plus sur la durée totale de la vie de la plante. La mesure de l'activité photosynthétique d'une culture serait un bon moyen, mais elle nécessite pour l'instant des procédés trop complexes et trop coûteux. Par contre, l'étude physique de l'eau dans la plante et plus spécialement dans les feuilles conduit à quelques méthodes intéressantes, mais qui ne donnent que des valeurs ponctuelles et instantanées : ce sont les mesures de pression de succion, de transpiration et d'ouverture des stomates.

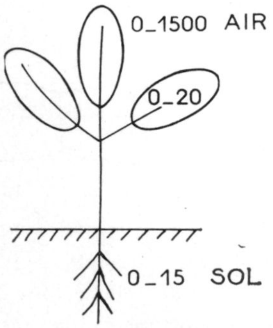


FIG. 1. *Répartition des potentiels en atm·cm³.*

La plante puise dans le sol l'eau qu'elle rejette dans l'air (fig. 1) ; l'état de l'eau dans le sol peut être caractérisé par son potentiel (1) : celui-ci doit être inférieur à

(1) La différence de potentiel entre deux états est mesurée par l'énergie mise en jeu quand l'unité de masse d'eau (un gramme) passe du potentiel de l'état de référence (eau libre) à celui de l'état considéré. C'est cette énergie qui est ici désignée par le terme de potentiel. Si P (atm.) est la pression et v le volume spécifique de l'eau ($v = 1$ cm³ ·g⁻¹), le potentiel sera donné par $\Psi = Pv$; ou encore si T est la température absolue (°K) et e l'humidité relative de l'air en équilibre avec l'eau considérée, on a Ψ (atm. cm³) $= 10{,}497\ T \log \frac{100}{e}$; l'état de référence est ici celui correspondant à $e = 100$, degré hygrométrique en équilibre avec l'eau libre. L'unité « atm. cm³ » est couramment utilisée en Chimie-Physique comme unité d'énergie. 1 atm. cm³ = $1{,}0132.10^6$ ergs. Les pressions de succion (en atm.), dont nous parlerons plus loin, sont numériquement égales aux potentiels correspondants (en atm. cm³), le volume spécifique de l'eau étant de 1 cm³.

environ 15 atm. cm^3 (point de flétrissement permanent) pour permettre la survie des plantes.

Dans l'air, on peut également parler d'un potentiel de l'eau ; il sera, à 17°C, de 20 atm. cm^3 pour une humidité relative de 98,6 p. 100, de 500 atm. cm^3 pour une humidité de 69 p. 100 et de 1500 atm. cm^3 pour une humidité de 32 p. 100.

I. — PRESSION DE SUCCION

La plante se trouve donc soumise à un gradient de pression souvent important. Il est à noter que, de la feuille à l'air, l'eau passe de l'état liquide à l'état vapeur : cette vaporisation est liée au bilan énergétique et à la diffusion de l'eau. Le problème est de savoir comment la plante va réagir aux modifications du milieu extérieur.

Quel est alors l'état de l'eau dans la plante ? Quel est son potentiel ? C'est ce que les auteurs expriment en évaluant la pression de succion que l'on appelle aussi tension de succion, force de succion ou déficit de pression de diffusion (DPD) ou encore énergie libre spécifique ; les Allemands l'appellent Saugkraft. Quelles sont les composantes de cette pression de succion ? En première approximation, à l'état statique, la pression de succion P_s est la somme algébrique de la pression osmotique P_0 du suc vacuolaire qui, négative, tend à faire pénétrer l'eau des milieux extérieurs hypotoniques et de la pression mécanique positive P_m exercée en sens inverse par la membrane et qui tend à chasser l'eau de la cellule (fig. 2).

$$P_s = P_0 + P_m.$$

La pression P_s est généralement négative, c'est sa valeur absolue que l'on considère.

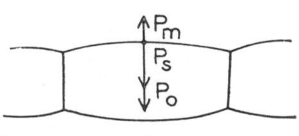


FIG. 2. *Les pressions dans la cellule.*

Si la membrane est détendue, $P_m = 0$ et $P_s = P_0$; P_s est alors appelée pression osmotique de plasmolyse-limite. Si une telle cellule plasmolysée est mise dans un liquide hypotonique, sa pression osmotique P_0 décroît légèrement en valeur absolue, par contre sa pression mécanique P_m croît, donc P_s, la pression de succion, décroît en valeur absolue ; elle atteint zéro, si la solution hypotonique est de l'eau pure et à condition que la cellule n'éclate pas.

La mesure des pressions de succion en solutions aqueuses consiste à rechercher la solution de saccharose de concentration telle qu'il n'y ait pas d'échange d'eau avec les tissus qui y sont immergés. Dès lors la pression de succion de l'organe végétal est égale à la pression osmotique de la solution considérée.

La détection des échanges peut se faire de différentes manières. Deux procédés sont spécialement intéressants : la méthode réfractométrique de MAXIMOV et la méthode densimétrique ou des jets de CHARDAKOV. Le réfractomètre permet d'apprécier la variation de l'indice de réfraction des solutions-essais de concentration différente

dans lesquelles ont été immergés les fragments d'un même tissu : la représentation graphique de ces variations donne alors la solution cherchée. Dans la méthode densimétrique, on introduit au sein de chaque solution-témoin une goutte de la solution-essai correspondante et préalablement teintée par quelques grains d'un colorant soluble (bleu de méthylène, rouge Congo, etc.). L'examen du comportement de cette goutte (chute, ascension ou stabilité) permet la résolution du problème. La première de ces méthodes est plus commode d'emploi, moins sujette aux erreurs, mais plus coûteuse ; elle nécessite un très bon réfractomètre équipé si possible d'un thermostat.

Malheureusement, les déterminations de pression de succion par ces méthodes sont longues : il faut environ une heure pour faire une seule détermination ; il existe quelques difficultés techniques. Dans les meilleures conditions, l'erreur expérimentale n'excède guère une atmosphère. Les résultats sont difficiles à interpréter : les pressions de succion ne sont pas homogènes ; en effet le débit de l'eau dans la plante est lié obligatoirement à des gradients de pression de succion. De plus, ces dernières évoluent au cours de la journée et ce différemment selon les conditions météorologiques.

A titre d'illustration, la figure 3 donne à Versailles la variation au cours de quelques journées de la pression de succion du Blé ainsi que celle du déficit de tension de vapeur dans l'air ; ce facteur météorologique est intéressant car, en première approximation, on peut admettre que le pouvoir évaporant de l'air est proportionnel au déficit de tension de vapeur $\Delta f = F - f$ et à la racine carrée de la vitesse du vent. On notera que l'accroissement de la pression de succion est particulièrement net quand Δf dépasse 6 mm de mercure. On remarquera également que les valeurs du 3 mai sont supérieures à celles du 6 avril ; ce dernier effet est vraisemblablement dû au dessèchement du sol dont le déficit théorique D_{th} avait atteint 65 mm le 3 mai. Enfin, il est remarquable de constater qu'un sol bien gorgé d'eau (6 avril) ne suffit pas toujours à assurer une alimentation correcte en eau de la plante ; en effet un pouvoir évaporant trop élevé peut entraîner un déséquilibre ; ce déséquilibre provoque alors une fermeture des stomates et par là même une déficience de la photosynthèse.

II. — TRANSPIRATION

D'autres mesures sont possibles : l'état de l'eau dans la plante va contrôler son départ par la feuille, c'est-à-dire la transpiration qui a lieu par les stomates et la cuticule. Quelle que soit la méthode employée, il faut toujours comparer la transpiration de la plante au pouvoir évaporant de l'air, c'est la seule façon d'obtenir des résultats intéressants.

Une des méthodes pratiques consiste à peser des rameaux ou des feuilles coupés et à comparer leur perte de poids à l'évaporation d'une pastille d'évaporomètre Piche. Une balance de torsion convient parfaitement pour faire ces pesées. Il existe des objections théoriques concernant principalement le bilan énergétique de la pastille, mais la méthode semble valable et peut probablement être utilisée pour tester les effets d'une irrigation.

A Versailles, le 10 mai 1960 vers 9 heures du matin, pour une évaporation sur pastille Piche d'environ 0,3 $mg.cm^{-2}.min^{-1}$, soit environ 0,18 $mm.h^{-1}$ (1), la trans-

(1) Il ne s'agit bien entendu que d'une valeur ponctuelle et instantanée qui n'a qu'un rapport assez lâche avec les évapotranspirations réelles ou potentielles, facteurs météorologiques traduisant une intégration dans le temps et dans l'espace.

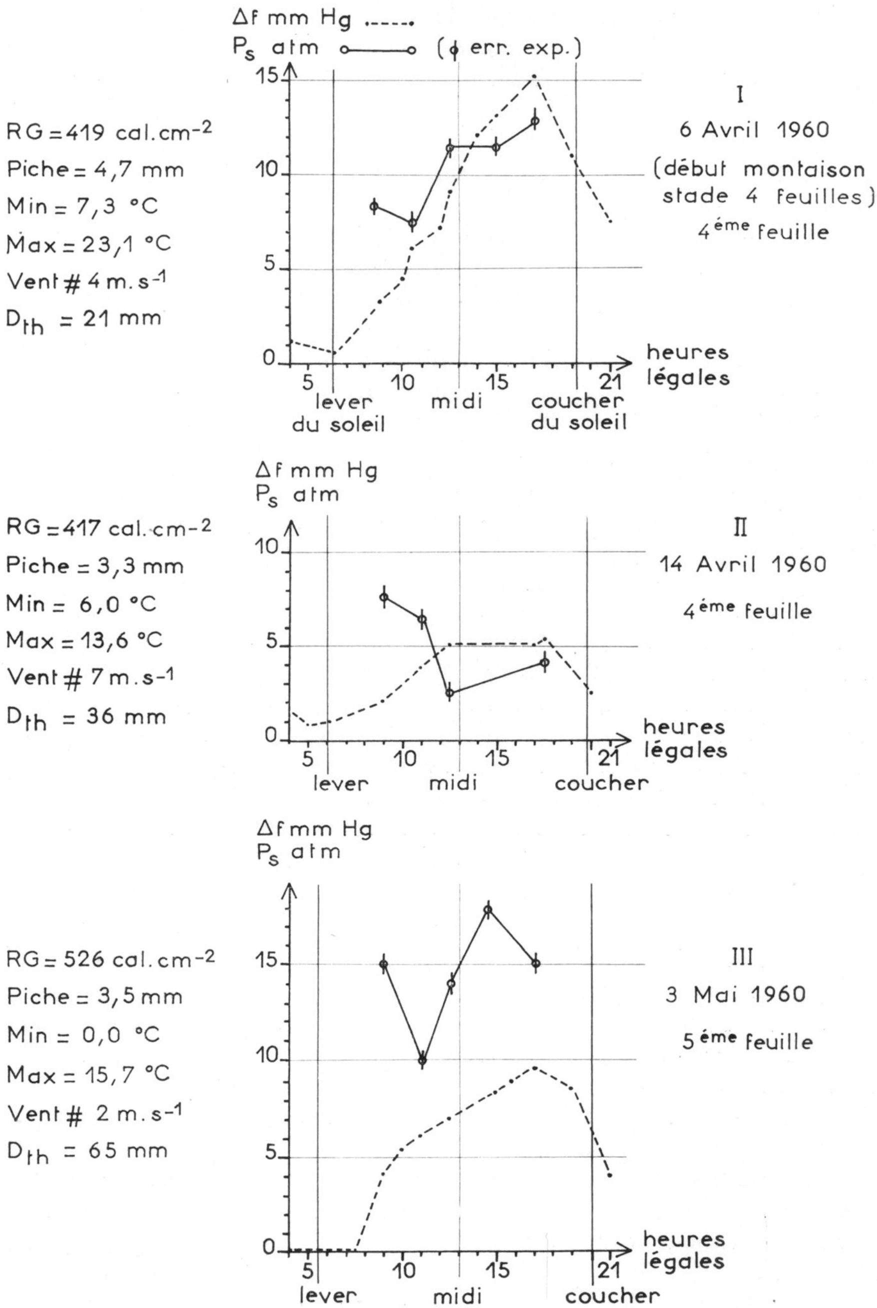


FIG. 3. *Graphiques* I, II, III, *donnant l'évolution au cours de trois journées, de la pression de succion* P_s *du blé* (var. Etoile de Choisy) *et du déficit de tension de vapeur dans l'air* ($\Delta F = F - f$)

piration du blé (var. Étoile de Choisy) était de 0,26 $mg.cm^{-2}.min^{-1}$, soit un rapport T/E = 0,87 ; par contre, à 15 h. et à 17 h., l'évaporation étant de 0,6 $mg.cm^{-2}.min^{-1}$, soit environ 0,36 $mm.h^{-1}$, la transpiration du même blé n'était que de 0,2 $mg.cm^{-2}.min^{-1}$ (T/E = 0,33).

III. — OUVERTURE DES STOMATES

Il peut être très utile pour mieux connaître les réactions de la plante de contrôler l'ouverture des stomates par des méthodes appropriées (techniques d'infiltration ou mieux observation microscopique directe sur la plante en place), mais pour l'instant elles sont surtout qualitatives.

Ainsi, dans l'exemple précédent, les stomates étaient ouverts le matin, tandis que l'après-midi ils étaient fermés. De même, sur évapotranspiromètre, les stomates de luzerne se fermaient l'après-midi pour des valeurs assez fortes de l'évapotranspiration instantanée.

CONCLUSION

Ces méthodes, dont nous avons entrepris la mise au point à Versailles au cours de ces deux dernières années, donnent de bonnes indications pour tester l'efficacité des irrigations ; elles présentent l'inconvénient de fournir des valeurs ponctuelles et instantanées. Elles ont d'ailleurs été mises en application à Dijon et à Tunis durant l'été 1960 (Cf. les articles de Mme MÉRIAUX et de M. J. DAMAGNEZ dans ce même numéro). Si les expériences de rendement permettent d'obtenir des données globales sur l'effet de la sécheresse durant toute la végétation, il nous manque encore des tests pratiques et économiques intégrant les effets de la sécheresse sur de courtes périodes. Quelques aspects particuliers de ces problèmes, dont le schéma général est ici esquissé, seront traités plus en détail par la suite.

Reçu pour publication en novembre 1960.

RÉSUMÉ

L'irrigation a pour but d'améliorer l'alimentation en eau des plantes. Pour tester son efficacité, on peut utiliser le rendement qui donne une valeur globale, mais aussi des tests physiologiques (mesures de pression de succion, de transpiration et étude de l'ouverture des stomates) qui donnent des indications ponctuelles et instantanées de l'état de l'eau dans la plante.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) HALLAIRE M., 1953. Diffusion capillaire de l'eau dans le sol et répartition de l'humidité en profondeur sous sols nus et cultivés. Thèse Ing. Doct., n° 404, 106 pages, 1953 et *Ann. INRA*, série A, mars-avril, p. 143-245.

(2) LEMEE G. et LAISNE G., 1951. La méthode réfractométrique de mesure de la succion. Comparaison avec la méthode des lanières d'Ursprung. Applications physiologiques et écologiques. *Rev. Gén. Bot.*, 58-59, p. 336-347.

(3) LEMEE G., 1956. Aspects écologiques de la régulation stomatique de la transpiration. *Bull. Soc. Franç. Physiol.*, **2**, n° 1, p. 29-38.
(4) LEMEE G., 1959. Bilan d'eau des plantes vasculaires dans ses rapports avec l'humidité du sol. *Bull. Soc. Franç. Physiol.*, **5**, n° 3, p. 118-132.
(5) MILTHORPE F. L., 1959. Plant factors involved in transpiration. *U. N. E. S. C. O. Madrid Symposium*, paper n° 1.
(6) STALFELT M. G., 1956. Die stomatäre Transpiration und die Physiologie der Spaltöffnungen. *Encyclopedia of Plant Physiology*, edited bv W RUHLAND, vol. III, p. 351-426.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 81-86

633. 22 : 631. 67

OBSERVATIONS SUR L'IRRIGATION DU DACTYLE EN SOL DE RÉSERVE HYDRIQUE MOYENNE

Suzanne MERIAUX et C. PERREY
Station d'Agronomie, Centre de Recherches agronomiques du Centre Est, Dijon.

La production fourragère ne peut atteindre son maximum en régime de haute fertilisation que dans des conditions d'alimentation en eau non déficiente.

Dans les sols de réserve hydrique modérée, si la pluviosité est irrégulière ou insuffisante, la plante souffre de la sécheresse et sa croissance est entravée.

Nous avons étudié les effets d'un apport complémentaire d'eau sur le développement végétatif et la composition du dactyle et parallèlement nous nous sommes efforcés de mesurer le besoin en eau des plantes par la force de succion des feuilles.

I. — CONDITIONS DE MILIEU

1° *Climat et sol*

L'année 1960 est caractérisée dans le Centre-Est par un printemps sec avec des précipitations orageuses donnant lieu à un drainage des sols, et une période pluvieuse depuis le 7 juillet.

Le déficit théorique s'est élevé à 210 mm (graphique 1)

L'essai a été réalisé au Domaine expérimental d'Epoisses sur un sol dont la réserve hydrique est de 100 mm environ.

Le déficit réel du sol (graphique 1) mesuré par des profils hydriques n'a pas dépassé 80 mm dans les témoins. En raison des apports d'eau il était en général très faible dans les parcelles irriguées.

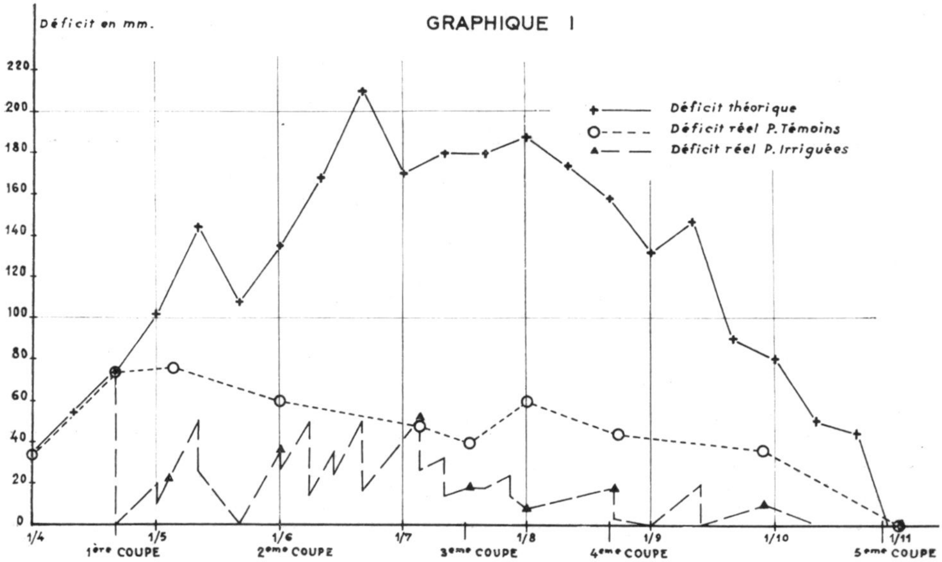
Le dactyle C. B. a été fertilisé de façon intensive par 330 kg d'azote par hectare au cours de la campagne.

2° *Base des irrigations*

La dose hebdomadaire I (mm) était calculée à partir de l'évapo-transpiration potentielle E. T. P., dont on retranchait les précipitations : I = E T P – P.

E T P était déduit de la formule de BOUCHET.

Sur le graphique 1 la courbe de déficit réel des parcelles irriguées montre l'importance et le rythme des arrosages.



II. — RÉSULTATS CULTURAUX

1° *Rendements*

Sur les cinq exploitations réalisées au cours de la campagne, la 2e et la 3e se rapportent à des végétaux ayant reçu un apport d'eau complémentaire qui a occasionné une augmentation importante de production. De plus, l'irrigation a eu une arrière action sur la coupe suivante qui accuse une différence de rendement de 30 p. 100. Les rendements de chaque coupe et leur analyse individuelle figurent sur le tableau 1.

TABLEAU I

Rendements de chaque coupe.

(en tonnes de matière sèche par ha et en indice)

Date	Parcelles témoins	Parcelles irriguées	p.p.d.s.	Précipitations	Apports complémentaires
1° coupe 21 Avril	2,29	2,23	N.S.	53	0
2° coupe 31 Mai......	3,37	5,00	0,87	86	117
	100	148	26		
3° coupe 15 Juillet ...	1,69	3,20	0,11	112	142
	100	189	3,3		
4° coupe 20 Août	2,52	3,40	0,22	107	10
	100	134	9,0		
5° coupe 26 Octobre ..	3,16	3,00	N.S.	284	36
Total des 5 coupes....	13,03	16,93		589	305
	100	130			

L'analyse d'ensemble des 2e, 3e et 4e coupes, à rendements différenciés se résume ainsi :

	Témoins	Parcelles irriguées	p. p. d. s.	Précipitations	Apports complémentaires
	—	—	—	—	—
En T. de MS/ha	7,58	11,58	0,68	305	269
En indice	100	153	9		

L'action de l'irrigation a été maximum à la 3e coupe.

2° *Modifications des organes végétatifs*

L'augmentation des rendements par l'irrigation n'est pas due uniquement à la croissance des plantes, mais aussi au maintien en vie des jeunes talles qui, sans apport d'eau de complément, n'auraient pu survivre à la sécheresse du printemps.

On observe en effet que, pour 100 talles dans les témoins, les parcelles irriguées en présentent 147. Il est à noter que le rapport des talles est voisin de celui des rendements moyens des 2e, 3e et 4e coupes.

Par contre, la distribution du profil radiculaire est nettement modifiée au détriment des parcelles irriguées dont l'enracinement, après apport de 269 mm d'eau, est devenu extrêmement superficiel, ainsi qu'en témoignent les chiffres suivants en pourcentages pondéraux.

	0-5 cm	5-10 cm	10-20 cm	20-30 cm
	—	—	—	—
Témoins	58	22	15	5
Parcelles irriguées	79	12	7	2

Ces résultats montrent que l'irrigation avait rendu les plantes plus sensibles à la sécheresse.

III. — COMPOSITION DU VÉGÉTAL

Le fourrage des parcelles irriguées des 2e, 3e et 4e coupes est significativement plus humide que celui des parcelles témoins.

L'action de l'irrigation a en outre porté sur la diminution du taux *d'azote* des *parties aériennes*, et l'augmentation de leur taux de *sodium*, les autres éléments ne subissant pas de variation significative.

TABLEAU 2

Composition des parties aériennes.

	2° coupe	3° coupe	4° coupe
Humidité (% de matière fraîche)	—	—	—
Témoins	80,2	82,2	84,1
Parcelles irriguées	82,5	83,9	86,1
Azote (% de matière sèche)			
Témoins	3,14	4,15	3,81
Parcelles irriguées	2,87	3,30	3,42
Sodium (% de matière sèche)			
Témoins	0,26	0,69	0,25
Parcelles irriguées	0,37	0,80	0,41

La diminution du taux d'azote dans les plantes peut s'expliquer par la dilution occasionnée par l'irrigation.

Quant à l'augmentation du taux de sodium, elle semble liée à la présence de 8 mg de Na par litre d'eau d'irrigation.

En effet, les quantités de sodium ainsi apportées s'élèvent à 22 kg par ha. Elles sont voisines du supplément d'exportation dans les parcelles irriguées. D'ailleurs le taux de sodium échangeable du sol à la fin de la campagne est uniformisé dans tout l'essai (0,23 m. e. pour 100 g).

Dans les *racines*, on constate, à la suite de l'irrigation, un abaissement du taux de potassium et une augmentation du taux de calcium et magnésium.

Les *exportations* en éléments minéraux sont très élevées, particulièrement en N et K_2O, ainsi que le montrent les chiffres suivants en kg d'élément par hectare :

	N	P_2O_5	K_2O	Ca	Mg	Na
Témoins	448	109	520	67	22	44
Parcelles irriguées..	542	137	664	90	26	72

IV. — FORCE DE SUCCION DES FEUILLES

La force de succion ou déficit de pression de diffusion (D P D) a été mesurée par la méthode « des Jets » de CHARDAKOV dans les parcelles témoins et irriguées, du 21 Avril au 15 Juillet.

a) *Variation du DPD avec les facteurs climatiques*

Pour interpréter correctement les valeurs du DPD il convient d'en étudier la variation au cours de la journée et en fonction des conditions climatiques.

Nous avons constaté, que, à 9 h du matin, quels que soient la température, l'humidité relative et le déficit du sol, le DPD est relativement bas, de 8 à 12 atmosphères, traduisant un faible besoin en eau de la plante.

Par contre au cours de la journée, il varie dans le sens de la température et à l'inverse de l'état hygrométrique. La valeur maximum du DPD atteinte dans nos mesures est 25 atmosphères.

Notons que la précision de ces mesures est de 1 à 2 atmosphères.

L'analyse statistique d'ensemble des valeurs du DPD obtenues pendant 4 mois met en lumière une action hautement significative de la date à laquelle les mesures ont été faites. Cette action s'interprète par la fluctuation des conditions climatiques d'une série de déterminations à l'autre, comme le suggère le graphique II.

Ce graphique représente la variation, d'ailleurs assez lâche, du DPD avec le déficit de tension de vapeur d'eau de l'atmosphère $F\text{-}f$ ($F(t)$ = tension maximum à la température t ; f = tension réelle).

$F\text{-}f$ synthétise l'action de la température, de l'humidité relative, de la durée d'insolation et de l'évapo-transpiration potentielle que nous avions observée sur le DPD.

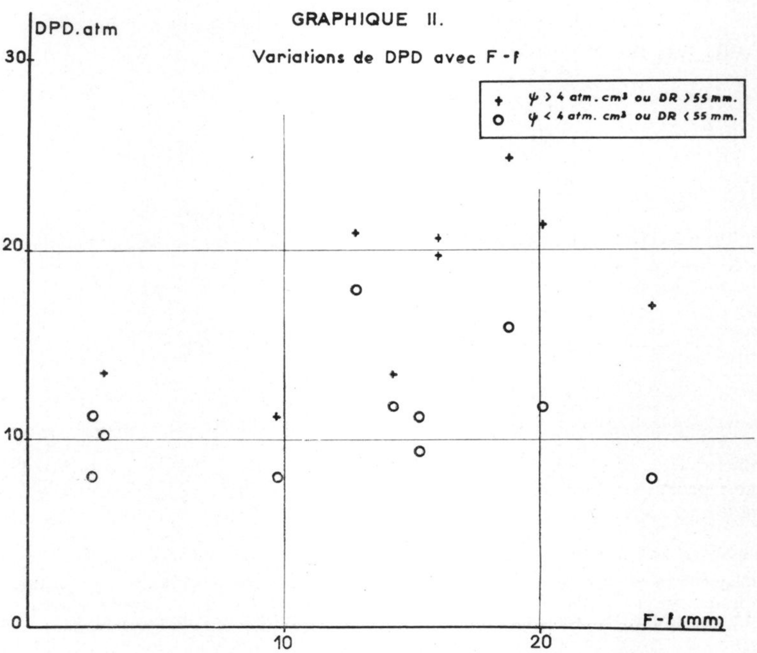
b) *Variation du DPD avec l'état hydrique du sol*

L'influence primordiale des facteurs climatiques sur le DPD masque l'action propre du déficit en eau du sol. Cette action apparaît toutefois sur le graphique 2 qui montre une certaine supériorité des valeurs du DPD quand le potentiel capil-

laire de l'eau dans le sol dépasse 4 atm. cm³ ou quand le déficit réel s'élève au-dessus de 55 mm.

D'autre part, l'effet de l'irrigation sur la force de succion des feuilles traduit clairement l'influence de l'état hydrique du sol. En effet, bien qu'au cours des 4 mois d'études, en raison des variations de climat, les différences de DPD entre témoins et parcelles irriguées n'aient pas toujours été significatives, il apparaît à l'analyse d'ensemble une action hautement significative de l'irrigation sur la force de succion des feuilles.

D'après nos observations, les feuilles de dactyle irrigué fréquemment, pouvant être considérées comme ne présentant pas de besoin en eau, manifestent des forces de



GRAPHIQUE II.
Variations de DPD avec F-f

succion relativement élevées, variant de 8 à 16 atmosphères selon les conditions météorologiques.

Parallèlement le DPD des feuilles de dactyle témoin se situe entre 11 et 25 atmosphères.

Il est toutefois intéressant de noter la discordance constatée entre la force de succion des feuilles et le potentiel capillaire de l'eau dans les 30 cm de sol intéressés par les racines.

En résumé, le dactyle, dans les conditions climatiques assez humides de l'année 1960, sur un sol de réserve hydrique moyenne représentatif d'une certaine région du Centre-Est, a réagi de façon très sensible à l'irrigation par un excédent de production de 4 tonnes de matière sèche par hectare.

Le dactyle irrigué est plus pauvre en azote et plus riche en sodium que le dactyle témoin.

L'action de l'irrigation sur le besoin en eau de la plante s'est traduite par une diminution significative du DPD de ses feuilles, bien que l'influence des facteurs météorologiques instantanés soit prépondérante. Toutefois la valeur du DPD minimum reste relativement élevée.

On pourrait en conclure que l'irrigation, tout en palliant dans une certaine mesure les effets de la sécheresse, ne suffit pas pour assurer la pleine turgescence des feuilles et ne conduit pas obligatoirement aux rendements optimaux.

Il est possible toutefois que les DPD relativement élevés mesurés en parcelles arrosées soient liés à l'enracinement très superficiel provoqué par l'irrigation elle-même.

La solution la meilleure consisterait donc à apporter l'eau en facilitant la pénétration en profondeur du système radiculaire. C'est dans cette perspective que nous poursuivrons nos recherches.

Reçu pour publication en novembre 1960.

RÉSUMÉ

Une culture de Dactyle hautement fertilisé en sol de réserve hydrique moyenne a reçu une irrigation de complément par doses hebdomadaires calculées à partir de l'évapotranspiration potentielle après déduction des précipitations.

En raison de l'abondance des pluies à partir de juin les apports d'eau n'ont été effectués que sur 2 cycles végétatifs. Ils ont entraîné une augmentation de rendement et, de plus, une arrière-action a été constatée.

Les excédents de production s'élèvent à 4 tonnes de matière sèche par hectare pour un apport de 269 mm d'eau.

L'augmentation de rendement est dûe, d'une part à la croissance des plantes, d'autre part, au maintien en vie de jeunes talles qui n'auraient pu survivre à la sécheresse du printemps

Par contre, le profil racinaire est nettement moins favorable après irrigation car 80 p. 100 des racines sont répartis sur les 5 cm superficiels.

Les plantes irriguées sont appauvries en azote du fait de la dilution et enrichies en sodium par les quantités de cet élément contenues dans l'eau.

Les exportations sont particulièrement élevées en azote et en potasse.

Sous l'aspect du besoin en eau de la plante, l'effet de l'irrigation s'est traduit par une diminution de la force de succion des feuilles, bien que la valeur minimum de D. P. D. observée reste relativement élevée et que les facteurs météorologiques instantanés aient une action prédominante.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 87-97

631. 67

IRRIGATION ET UTILISATION DES RÉSERVES NATURELLES

M. HALLAIRE

Station centrale de Bioclimatologie, Centre national de Recherches agronomiques, Versailles.

On doit s'efforcer, dans la pratique de l'irrigation, de réduire au maximum les apports d'eau au sol et de les reporter si possible sur la saison humide sans diminuer pour autant la consommation du végétal. Or, diverses recherches relatives aux bilans hydriques, à la diffusion de l'eau dans le sol et à la réaction physiologique des plantes cultivées nous ont amené à examiner dans quelles conditions la végétation pouvait tirer parti des réserves naturelles accumulées non seulement dans la couche arable mais également dans les couches plus ou moins profondes du sous-sol. Ainsi avons-nous été amené à réviser certaines conceptions classiques en matière d'irrigation, à envisager les solutions qui permettent à la plante de s'alimenter normalement en eau, mais l'obligent à utiliser au maximum les réserves naturelles de la profondeur. Les hypothèses de travail exposées dans le présent article ont servi de point de départ aux recherches qui, entreprises à Tunis et Avignon, font l'objet, dans ce même numéro des articles de M. DAMAGNEZ et de Mme HUGUET.

I. — LE PROBLÈME DE LA RÉSERVE EN EAU DU SOL

On reviendra tout d'abord sur deux images classiques en matière d'irrigation, images qui conduisent à poser le problème de la réserve utile en eau du sol.

Portons l'attention sur l'humidité du sol H dans la zone radiculaire, humidité qui est susceptible, on le sait, de décroître, entre deux irrigations successives, de la capacité au champ H_0 au point de flétrissement permanent H_1. On s'est toujours demandé si l'on pouvait attendre pour irriguer que l'humidité ait atteint une valeur voisine de H_1 ou s'il était préférable de se fixer comme minimum une valeur supérieure

$$H_1 + \frac{H_0 - H_1}{3}, \qquad H_1 + \frac{H_0 - H_1}{2}, \ldots$$

Pour répondre à ce problème, on a recherché notamment comment variait la transpiration végétale E en fonction de l'humidité. Or, on a abouti à des résultats très différents tels que ceux représentés par les courbes A, B, C, de la Fig. 1. (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7).

La courbe A, résultant des travaux de VEIHMEYER, montre que la transpiration végétale demeure égale à sa valeur potentielle sur la quasi totalité de la gamme d'humidité utile $H_0 - H_1$. Le métabolisme végétal ne serait donc pas affecté par l'abaissement de H. Dès lors la réserve en eau du sol R, sur laquelle on peut effecti-

vement tabler, ne serait autre que la quantité d'eau disponible Q correspondant à l'abaissement d'humidité maximal H_0 — H_1 dans la couche explorée par les racines

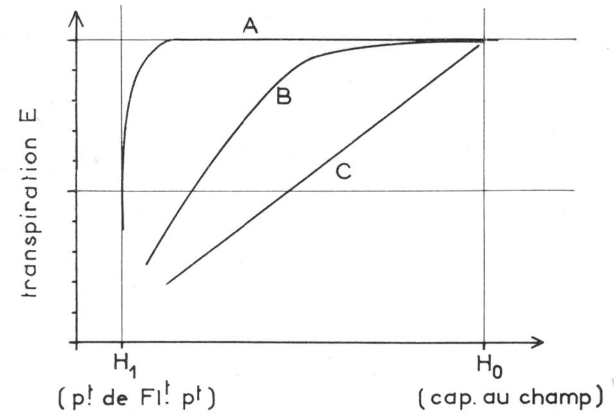


FIG. 1.

(profil Γ fig. 2). Dans un sol ne présentant pas de gradient vertical d'hétérogénéité, Q est donné (en mm d'eau) par la formule :

$$Q = \frac{\sigma}{10}(H_0 - H_1)(h + 15)$$

σ représentant la densité apparente du sol, H_0 — H_1 la gamme d'humidité utile, h la profondeur (en cm) de la frange radiculaire et le terme correctif 15 cm (moyenne approximative) permettant de tenir compte du dessèchement par diffusion capillaire des couches situées au-dessous de la frange radiculaire.

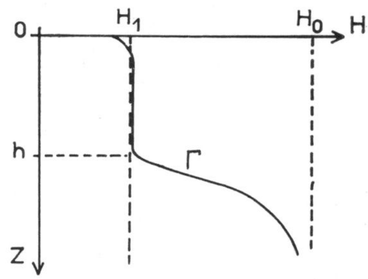


FIG. 2.

Si les valeurs de H_0, H_1 ou σ varient avec la profondeur z, la quantité Q s'exprimera alors par la formule plus générale :

$$Q = \sum_{0}^{h+15} \frac{\sigma}{10}(H_0 - H_1)\Delta z.$$

La courbe C de la Fig. 1, résultant des travaux de Richards, exprime une diminution systématique de E avec H. Elle inciterait au contraire à maintenir l'humidité aussi voisine que possible de la capacité au champ H_0 et à tabler par conséquent,

pour un même sol et une même profondeur des racines, sur une réserve en eau R inférieure à la quantité disponible Q.

Ainsi ces recherches sur la variation de la transpiration végétale conduisent à des résultats trop divers pour que l'on puisse en déduire quelle valeur de la réserve il y a lieu de retenir. Il en est de même des expériences d'irrigation consistant à réhumecter le sol lorsque l'humidité a atteint une valeur plus ou moins basse. Selon l'expérience, les différences de rendements sont significatives ou non. (8)

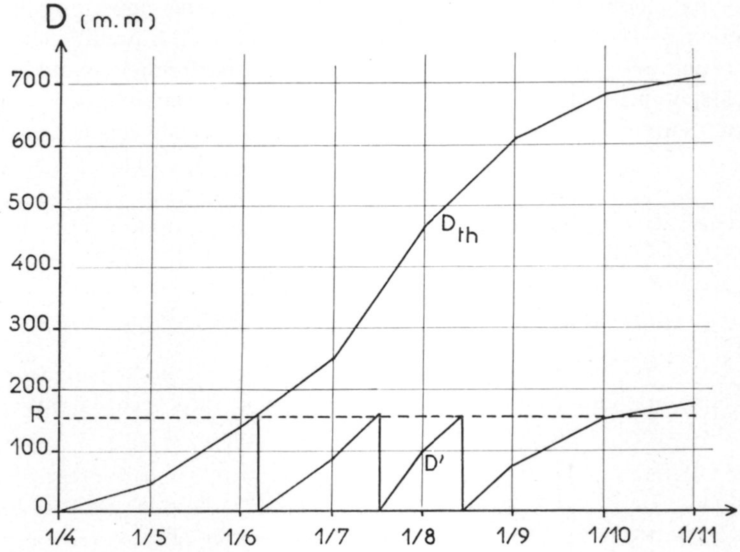


FIG. 3.

Dans les recherches sur l'irrigation on peut encore se baser sur le déficit calculé à partir des données météorologiques. Partant des données calculées de l'évapotranspiration potentielle ETP, on peut estimer quotidiennement l'accroissement du déficit théorique,

$$\Delta D_{th} = ETP - P \text{ (mm)}$$

P désignant les précipitations, et représenter alors graphiquement D_{th} en fonction du temps *t* (fig 3).

Dès lors, si l'on s'est fixé d'avance la valeur de la réserve R, on ramènera par irrigation le déficit à zéro quand il aura atteint la valeur en question (courbe D', fig. 3). Mais dans cette seconde image le problème de l'estimation de la réserve en eau du sol demeure encore entier.

II. — LES FACTEURS RESPONSABLES DE LA RÉDUCTION DE LA TRANSPIRATION VÉGÉTALE

Au fur et à mesure que l'humidité du sol décroît, les forces d'adhésion eau-sol augmentent et le potentiel capillaire de l'eau, travail nécessaire pour extraire du sol un gramme d'eau, augmente également. On devrait ainsi logiquement s'attendre à

ce que la transpiration diminue, tout autre facteur demeurant constant, en même temps que H. C'est ce qui explique les efforts entrepris par maints chercheurs pour relier, comme on l'a vu (fig. 1), la transpiration végétale au potentiel capillaire ou, ce qui revient à peu près au même, à la situation de l'humidité entre ses deux extrêmes H_0 et H_1, soit $\frac{H - H_1}{H_0 - H_1}$.

En fait, les courbes classiques donnant le potentiel capillaire Ψ (ou $\log \Psi = pF$) en fonction de H n'ont le sens qu'on leur prête que dans les conditions de réversibilité c'est-à-dire d'équilibre. C'est pour cette raison, pensons-nous, que les résultats sur la réaction de la transpiration végétale en fonction de l'humidité sont aussi discordants. Dans les conditions de non-équilibre et en particulier quand H n'est pas constant, le potentiel efficace de l'eau dans le sol apparaît, comme nous l'avons montré antérieurement (12), étroitement lié à la vitesse de dessèchement du sol $\Delta H/\Delta t$.

Or $\Delta H/\Delta t$ est évidemment proportionnel à l'évapotranspiration E. Dans le cas d'une végétation explorant une masse de terre m (g) contenue dans un récipient, a relation est

$$E(\text{g/jour}) = \frac{m}{100}\frac{\Delta H}{\Delta t}.$$

S'il s'agit d'une culture dont la frange radiculaire s'étend jusqu'à une profondeur de h (cm), on a vu formule (1) que le dessèchement intéressait en fait une couche d'épaisseur $h' \# h + 15$ (cm). La relation devient alors :

$$E(\text{mm/jour}) = \frac{c}{10}h'\frac{\Delta H}{\Delta t}.$$

Ainsi, revenant aux courbes de la fig. 1 donnant E en fonction de H, on voit maintenant que la variation relative de E peut aussi bien être exprimée par celle de $\Delta H/\Delta t$.

Opérant sur des plantes prélevées au champ avec des masses de terre m différentes et les soumettant à des conditions d'évapotranspiration différentes mais constantes dans le temps, nous avons été conduit dans la représentation indiquée à des ensembles de courbes tels que celui représenté fig. 4.

Chaque courbe présente un palier qui exprime que sur une certaine gamme d'humidité $H_0 - H_c$, la transpiration demeure maximale. Puis, pour $H < H_c$, on observe une décroissance linéaire de $\Delta H/\Delta t$; E devient donc inférieur à sa valeur potentielle. On notera que la droite obtenue coupe l'axe des abscisses pour une valeur de H'_1 sensiblement inférieure au point de flétrissement permanent H_1 (5,5 au lieu de 9 dans le cas du limon utilisé ici). Cela signifie, comme on le savait déjà, que l'absorption radiculaire n'est pas brusquement arrêtée quand l'humidité a atteint le point de flétrissement permanent H_1.

Mais le point important que font apparaître ces courbes c'est que l'humidité critique H_c à partir de laquelle l'évapotranspiration est réduite, dépend de la valeur de $(\Delta H/\Delta t)_M$ correspondant aux conditions d'évapotranspiration potentielle.

Si $(\Delta H/\Delta t)_M$ est faible (courbe A fig 4) l'évapotranspiration potentielle étant elle-même peu élevée ou la masse de terre m explorée par les racines étant importante, H_c sera alors très proche du point de flétrissement permanent H_1 et la transpiration

demeurera maximale sur la quasi totalité de la gamme d'humidité utile $H_0 - H_1$, ce qui est conforme aux résultats de VEIHMEYER (courbe A, fig. 1).

Si les conditions d'évapotranspiration sont momentanément intenses ou encore si la masse de terre *m* interessée par le dessèchement est faible, $(\Delta H / \Delta t)_M$ est alors élevé (courbe C fig. 4) et le potentiel efficace est grand même si l'humidité semble satisfaisante. On constate en ce cas que l'humidité critique H_c est beaucoup plus élevée, résultat qui va à l'appui de celui obtenu par RICHARDS (courbe C, fig. 1).

Ainsi la réduction de la transpiration est sous la dépendance de trois facteurs : de l'humidité du sol, comme chacun sait, mais aussi de l'évapotranspiration potentielle instantanée et de la masse de sol prospectée par les racines.

Que l'évapotranspiration devienne inférieure à ETP quand cette grandeur atteint des valeurs trop élevées et, en ce cas seulement, il s'agit là encore d'un fait connu. (9),

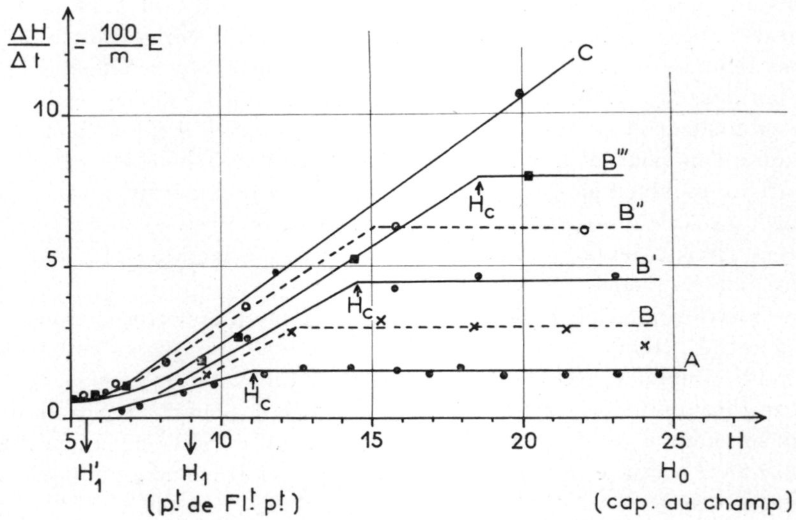


FIG. 4.

(10), (11). La fermeture des stomates aux heures les plus chaudes et leur réouverture par temps couvert, les variations du DPD observées en fonction des conditions climatiques (Cf. articles de Mme MERIAUX et de M. DE PARCEVAUX dans ce même numéro) en apportent la preuve. Ce phénomène confirme d'ailleurs l'intérêt des brise-vents et des plantes d'ombrage.

L'influence de la masse de sol explorée par les racines, moins connue mais cependant indéniable, peut être d'une grande importance en matière d'irrigation : si la frange radiculaire est profonde, la quantité d'eau disponible Q mise à la disposition des cultures sera relativement importante ; de plus le végétal pourra utiliser la quasi totalité de cette eau sans que sa transpiration soit réduite, puisque l'abaissement journalier d'humidité $\Delta H / \Delta t$ sera faible. La réserve R pourra donc être assimilée sans danger à la quantité disponible Q.

Ainsi, au cours de la sécheresse exceptionnelle de 1959, les vergers situés dans la région parisienne sur sol profond et sain ont très bien résisté dans l'ensemble et cela

jusqu'à la fin de septembre lorsque l'humidité approchait du point de flétrissement permanent sur les deux à trois mètres de sol soumis au dessèchement.

Au contraire, les arbres fruitiers de la région méditerranéenne qui n'explorent que la couche supérieure réhumectée par les pluies d'hiver, soit le plus souvent 1 à 1,5 m, ne peuvent épuiser le stock d'eau disponible sans que leur transpiration diminue. Ils gagnent ainsi à être irrigués bien avant que soit atteint le point de flétrissement permanent.

Si l'on pouvait en pareil cas multiplier par deux la profondeur des racines et le stock disponible, la réserve sur laquelle on pourrait compter se trouverait multipliée non par 2 mais par 3 ou 4.

Les résultats qui viennent d'être rapportés permettent d'examiner sous un jour nouveau différents procédés d'irrigation des plantes pérennes :

L'irrigation estivale qui n'est pratiquée qu'en période de dessèchement consiste à fournir une dose I correspondant aux pertes théoriques du sol (ETP — P) depuis le début de la période de dessèchement ou depuis la dernière irrigation. Si le sous-sol n'est pas réhumecté naturellement par les pluies d'hiver, on ne remédiera pas à cet état de fait. De toute façon cette technique ne favorisera pas l'allongement des racines vers la profondeur et conduira ainsi à limiter la quantité d'eau disponible. L'irrigation aura donc pour effet de sensibiliser la plante à la sécheresse.

L'irrigation hivernale consiste à compléter la réhumectation naturelle, par épandage d'eaux de crues par exemple, et à augmenter ainsi le stock d'eau. La dose apportée en hiver I devrait en principe être égale à la différence (ETP — P) calculée sur l'ensemble de l'année.

Une solution intermédiaire consiste par exemple à apporter mensuellement la même quantité : (ETP — P)annuel x 1/12. Supérieure aux pertes nettes durant la saison froide et humide, cette dose contribue alors à réhumecter le sol en profondeur. En été au contraire la dose est inférieure aux pertes et permet un certain dessèchement du sol, mais ce dessèchement se trouvera ralenti du fait que la quantité d'eau disponible a été accrue et ne risque donc pas de porter gravement préjudice aux cultures.

L'irrigation hivernale (proprement dite ou mixte) semble donc une formule intéressante, en particulier en sol profond et sain lorsque la non-réhumectation du sous-sol est le facteur limitant de la croissance radiculaire.

III. — RÉSERVE EN EAU DU SOL ET CROISSANCE RADICULAIRE

On a raisonné jusqu'à présent sur une quantité d'eau disponible Q fixe, supposant ainsi implicitement que la frange radiculaire était invariable. Tel n'est pourtant pas le cas lorsqu'on envisage une culture annuelle, la betterave par exemple, dont les racines s'allongent régulièrement pour dépasser bien souvent un mètre. Il est alors évident que le même état de dessèchement du sol n'a pas le même effet sur la végétation selon l'époque considérée.

La quantité d'eau disponible Q est donnée par la formule :

$$Q = \frac{\sigma}{10}(H_0 - H_1)(h + 15);$$

son accroissement par unité de temps (mm/jour) est donc relié à l'allongement radiculaire $\Delta h/\Delta t$ (cm/jour), par :

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\sigma}{10}(H_0 - H_1)\frac{\Delta h}{\Delta t}.$$

Or, reportons-nous à la courbe (fig. 3) donnant D_{th} en fonction de t. Pour une période quelconque de (Δt) jours, on a :

$$\Delta D_{th} = ETP - P \text{ (mm)}$$

d'où

$$\frac{\Delta D_{th}}{\Delta t} = \frac{ETP - P}{\Delta t} \text{ (mm/jour).}$$

Cette dernière quantité qui n'est autre que la pente de la courbe D_{th} (t) (fig 3), a la dimension d'un débit. Elle représente ce que devrait être la contribution journalière du sol, en l'absence d'irrigation, pour que les besoins du végétal soient satisfaits.

Remarquons maintenant que la valeur atteinte par le déficit en eau n'est pas un test suffisant pour juger si les conditions d'alimentation en eau sont défavorables ou non. Un déficit élevé signifie sans doute que la plante doit prélever l'eau à des profondeurs importantes, mais il indique aussi que le système radiculaire a atteint un développement suffisant pour que le dessèchement ait atteint le degré observé.

Par contre le déficit étant ce qu'il est et la frange radiculaire ayant ainsi atteint ou dépassé la profondeur correspondante, le problème est de savoir si l'accroissement de la quantité d'eau disponible, $\Delta Q/\Delta t$, lié à la croissance radiculaire $\Delta h/\Delta t$ est égal ou supérieur à l'accroissement de déficit théorique $\Delta D_{th}/\Delta t$.

Les conditions d'une alimentation satisfaisante seraient donc définies par :

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} \geqslant \frac{\Delta D_{th}}{\Delta t}$$

soit

$$\frac{\sigma}{10}(H_0 - H_1)\frac{\Delta h}{\Delta t} \geqslant \frac{ETP - P}{\Delta t}.$$

Situons dès maintenant quelques ordres de grandeur. A Tunis, la pente $\Delta D_{th}/\Delta t$ dépasse 6 mm/jour pour l'ensemble de la période mai-septembre. Ce débit suppose une croissance radiculaire $\Delta h/\Delta t$ supérieure à $6 \times 10/\sigma(H_0 - H_1)$, soit 4 cm/jour dans le cas d'un sol moyen caractérisé par $\sigma = 1{,}5$ et $H_0 - H_1 = 10$. Le fait que toute plante annuelle souffre manifestement en l'absence d'irrigation d'une alimentation hydrique insuffisante prouve que l'allongement radiculaire ne saurait atteindre une telle valeur.

Dans la région parisienne et en année normale $\Delta D_{th}/\Delta t$ ne dépasse guère 2 mm/jour ; la valeur correspondante de $\Delta h/\Delta t$ n'est alors que de 1,3 cm/jour. Or, on a pu constater que dans ces conditions et sous betteraves le déficit peut rester très voisin du déficit théorique (fig. 5 A) ; l'alimentation hydrique apparaît donc satisfaisante. Les courbes représentées fig. 5 B confirment d'ailleurs que le dessèchement du sol intéresse de proche en proche les couches successives du sol pour atteindre ici la profondeur de 125 cm. Dans l'exemple présent la croissance radiculaire a donc atteint la valeur requise de 1,3 cm/jour environ.

En ce qui concerne l'irrigation, ces remarques conduiraient à miser sur une mobilisation progressive du stock naturel et à réduire d'autant les apports. S'il est prouvé que l'accroissement journalier de déficit Δ D/Δ t peut atteindre une valeur

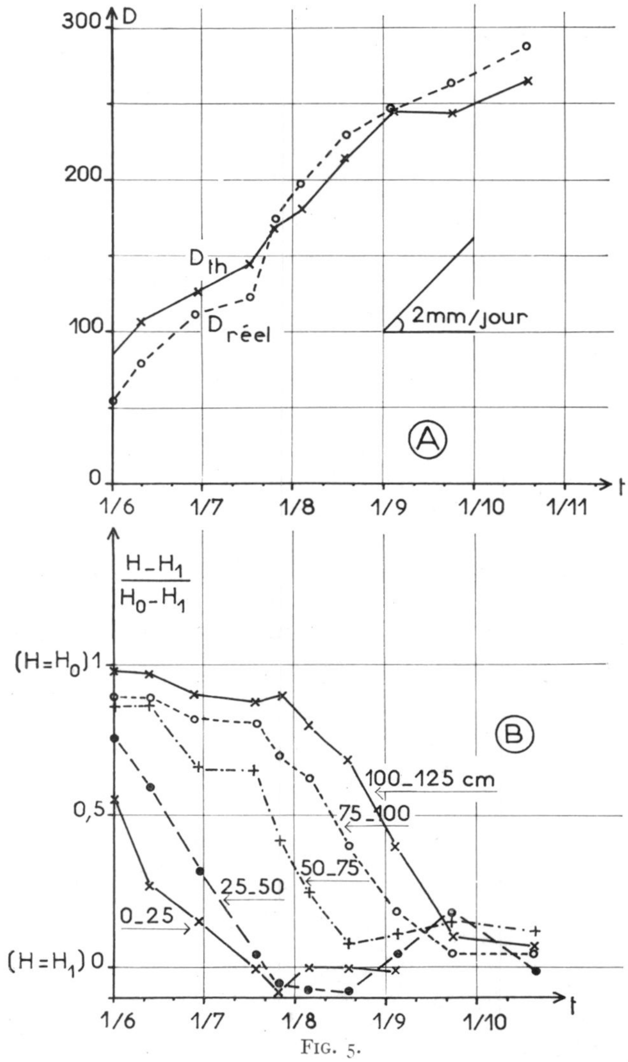


FIG. 5.

donnée q_0 sans préjudice pour la culture, les doses I seraient calculées de façon que l'on ait

$$\frac{\text{ETP} - (\text{P} + \text{I})}{\Delta t} = q_0.$$

En d'autres termes la dose I, donnée par :

$$\text{I} = \text{ETP} - \text{P} - q_0 \cdot \Delta t,$$

correspondrait aux besoins (ETP) diminués non seulement des pluies (P) mais aussi des apports possibles du sol-sous (q_0. Δ t).

Cela revient encore à dire que les doses I seraient calculées de façon que la courbe de déficit D devienne une droite de coefficient angulaire q_0 (D_1 ou D_2, fig. 6).

En matière d'expérimentation, chaque traitement serait caractérisé par une valeur de $(q_0)_{th}$ fixée d'avance. On rechercherait alors enfin de végétation quelle a été la contribution journalière réelle :

$$(q_0)_r = \frac{\Delta D_r}{N}$$

$(\Delta\ D)_r$ étant la variation réelle de déficit et N la durée en jours de l'expérience. Si dans la représentation $(q_0)_r$ en fonction de $(q_0)_{th}$, les points se situent sur la première

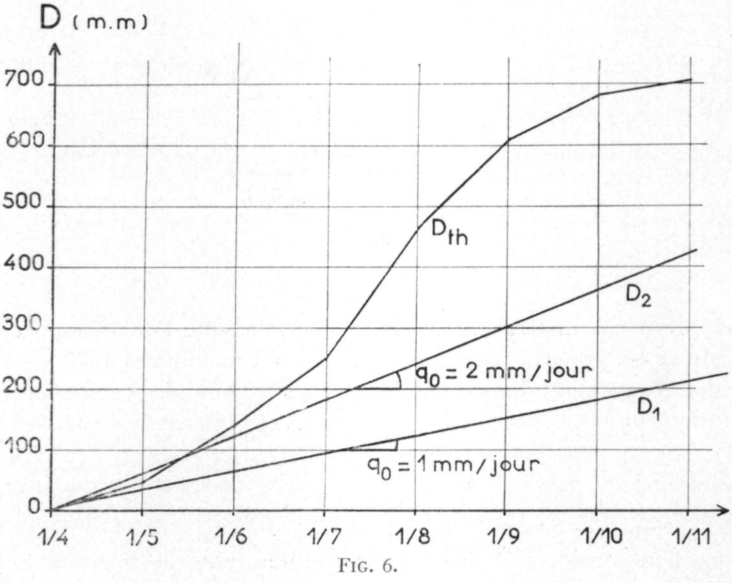


FIG. 6.

bissectrice (point M, fig. 7 A), on en concluera que l'alimentation a été satisfaisante et que l'obligation pour le végétal de prélever partiellement son eau en profondeur n'a pas réduit sa consommation. Dans le cas contraire où le point se situe au-dessous de la première bissectrice (point N), la plante aura été privée d'une quantité d'eau qui, par jour, est égale à $p = (q_0)_{th} - (q_0)_r$ et se lit immédiatement sur le graphique (fig. 7).

De même, les rendements R pourront être testés en fonction du paramètre $(q_0)_{th}$ (fig. 7 B).

Il sera évidemment intéressant d'associer les deux représentations qui se complètent si les différences de rendement sont imputables à des différences de consommation en eau.

Il convient de souligner que les hypothèses formulées ne s'appliquent qu'au cas où les réserves sont totalement reconstituées en début de végétation et où l'on considère une culture annuelle dont la frange radiculaire peut s'accroître régulièrement.

Elles supposent notamment que la croissance radiculaire n'est limitée pour aucune raison d'ordre mécanique (alios), physicochimique (horizon hydromorphe) ou physiologique (floraison).

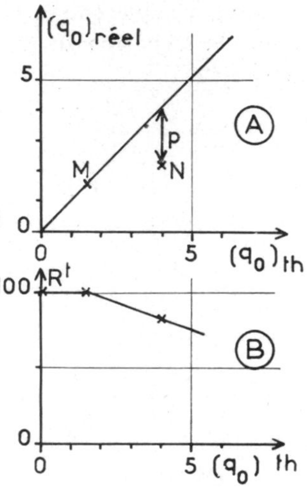


FIG. 7.

De tels essais permettraient de déterminer, lorsque l'on irrigue, de combien on peut réduire les apports par rapport aux doses maximales ETP — P, mais ils renseigneraient également, dans le cas des régions subhumides comme la région parisienne, sur les incidences possibles des sécheresses et l'intérêt éventuel de l'irrigation.

CONCLUSION

Que l'on considère le dessèchement d'une mase de terre explorée par un système radiculaire invariable ou le dessèchement progressif des couches successives de sol, lié à la propagation en profondeur de la frange radiculaire, des raisonnements et des résultats expérimentaux différents conduisent à une même idée : les réserves naturelles du sol et du sous-sol sont d'autant mieux utilisées par le végétal que le rythme d'extraction de l'eau est plus lent.

Appliquant cette conclusion au problème de l'irrigation et en particulier à celui de la réserve utile en eau du sol, on peut expliquer les résultats très contradictoires trouvés dans la littérature.

On est amené à envisager en outre des solutions qui, donnant au végétal la possibilité de mieux tirer parti du stock d'eau naturel, permettent de réduire les apports d'eau en saison sèche, mais en revanche conduisent éventuellement à reconstituer les réserves en hiver.

Ce seront en définitive les essais d'irrigation basés sur les théories proposées ici qui permettront de conclure.

Reçu pour publication en novembre 1960.

RÉSUMÉ.

Une culture dont le système radiculaire explore une profondeur de sol donnée et invariable dispose d'une quantité d'eau Q (mm). Il apparait parfois préférable d'irriguer avant l'épuisement de cette réserve, la transpiration végétale diminuant au fur et à mesure que le sol se dessèche (courbe C, fig. 1). Ce fait n'est cependant pas général, la transpiration demeurant parfois constante sur une large gamme d'humidité (courbe A, fig. 1).

Les expériences rapportées ici montrent que le facteur responsable d'une réduction de la transpiration végétale est la variation de l'humidité par unité de temps $\Delta H / \Delta t$: la transpiration demeure maximale ou potentielle (courbe A, fig. 4) si la valeur de $\Delta H / \Delta t$, à laquelle elle conduit, demeure faible (cas d'une évapotranspiration potentielle ETP faible ou d'une frange radiculaire profonde) ; on peut alors tabler sur une réserve utile égale à la réserve totale Q et laisser l'humidité s'abaisser jusqu'au voisinage du point de flétrissement permanent. Au contraire, la transpiration se met à diminuer avant épuisement des réserves Q (courbe C fig. 4) quand elle conduit à des valeurs élevées de $\Delta H / \Delta t$; les irrigations doivent alors être assez rapprochées pour que l'humidité demeure toujours voisine de la capacité du champ.

En ce qui concerne par ailleurs le cas des végétaux dont le système radiculaire croît en profondeur, cet allongement met à la disposition de la plante une quantité d'eau journalière q_0, qui variable avec la vitesse de croissance et avec le sol, est de l'ordre, en moyenne, de 1 à 2 mm/jour. On peut alors se demander si la dose optimale d'irrigation, habituellement exprimée par Σ (ETP-P), P désignant les pluies, ne peut être ramenée à Σ (ETP-P-q_0), ce qui conduirait à laisser croître régulièrement le déficit de q_0 mm/jour (droites D_1 ou D_2, fig. 6).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1) KELLEY O. J., 1954. Requirement and availability of soil water. *Adv. Agron.*, vol. XI, 67-94.

2) LOWRY William P., 1959. The falling evaporative soil moisture loss. A critical evaluation. *Bull. Amer. Met. Soc.*, **40,** 605-608.

(3) LEMON E. R., The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **20,** 120-125.

(4) VEIHMEYER F. J., et HENDRICKSON A. H., 1955. Rates of evaporation from wet and dry soils and their significance. *Soil Sci.*, **80,** 61-68.

(5) CLOSS R. L. Transpiration from plants with a limited water supply. Arid Zone Research XI. Clim. and Microclim. Proc. Canberra Symposium. UNESCO, 168-171.

(6) SLATYER R. O., 1959. Availability of water to plants. *Arid Zone Research XI Clim. and Microclim. Proc. Canberra Symposium,* 163.

(7) HIDE J. C., 1954. Observations on factors influencing the evaporation of soil moisture. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **18,** 234.

(8) STANHILL G., 1957. The effects of differences in soil moisture status on plant growth. A review and analysis of soil moisture regime esperiments. *Soil Sci.*, **84,** 234.

(9) MAKKINK G F., et VAN HEEMST H. D. J., 1956. The actual evapotranspiration as function of the potential evapotranspiration and the soil moisture. *Netherlands J. Agri. Sci.*, **4,** 67-72.

(10) SLATYER R. O., 1956. Evapotranspiration in relation to soil moisture. *Netherlands J. Agr. Sci.*, **4,** 73-76.

(11) BIERHUIZEN J. F., Plant growth and soil moisture relationships. Arid Zone Research. Actes du Colloque de Madrid-UNESCO (A paraître dans *Recherche sur la Zône Aride*).

12) HALLAIRE M., 1960. Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour la végétation. *Ann. Physiol. Vég.*, **2,** n° 2 119-130.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 99-107.

635 : 631. 811. 91

ESSAIS D'ÉVALUATION DES BESOINS EN EAU DE CULTURES MARAICHÈRES SOUS CLIMAT MÉDITERRANÉEN

Claire HUGUET

Avec la collaboration technique de MM. J. HOROYAN et Y. MEYNADIER.

Station d'Agronomie, Centre de Recherches agronomiques du Sud-Est, Montfavet (Vaucluse).

L'irrégularité de la répartition des pluies du climat méditerranéen, conditionne dans le midi de la France, les rendements de la plupart des cultures légumières de plein champ, pomme de terre, artichaut, tomate, melon, lorsque ces plantes sont exploitées dans les zones non irriguées. L'extension actuelle des périmètres irrigués, pose le problème de la détermination des « besoins en eau » de ces cultures, quand leur développement ne dépend plus uniquement des chutes problématiques de pluies.

I. — BUT DES ESSAIS

L'étude entreprise, se propose de contrôler l'influence de quatre niveaux différents d'alimentation en eau, sur la production d'une culture de tomates industrielles, dont l'aire d'implantation dans le midi de la France, est en voie d'extension ; cette plante présente, vis-à-vis des essais, l'avantage d'atteindre un développement foliaire suffisant pour servir de couverture au sol et celui d'émettre un système radiculaire susceptible d'explorer le sol en profondeur.

Au point de vue fondamental, ces travaux sont destinés à évaluer la contribution du sol à l'alimentation hydrique des plantes, à partir de ses réserves, dans le cadre des hypothèses émises par HALLAIRE, ainsi qu'à juger des possibilités d'utilisation de la formule de l'évapotranspiration potentielle de BOUCHET, dans le domaine des essais, contrôlant les irrigations.

On sait qu'une plante qui couvre le sol, consomme au maximum la dose d'eau correspondant à l'évapotranspiration potentielle, lorsque la fourniture de l'eau au végétal est réalisée sans restriction.

Nous considérerons comme acquise, la définition donnée par HALLAIRE, relative à la faculté du sol, de livrer ses réserves en eau pour subvenir à l'alimentation des plantes et désignée par le terme de « contribution théorique du sol ».

Pour une période de n jours, l'évapotranspiration potentielle étant ETP, la contribution théorique du sol est :

$$q = \text{ETP} - (\text{P} + \text{I})$$

P et I étant respectivement les hauteurs de pluies et d'irrigation pendant la période envisagée.

II. — CONDUITE DES ESSAIS

Ils ont été conduits en 1959 et 1960 au Domaine de la Station, dans un sol de limon sableux profond, pauvre en matière organique, dont on a mesuré les caractères hydrodynamiques suivants : (Tableau 1).

TABLEAU 1

Profondeur du sol	Humidité équivalente	Point de flétrissement	Densité apparente
0 à 0 m 20	25,6	13,6	1,18
0 m 20 à 0 m 49	24,7	12,4	1,29
0 m 80 à 1 m	24,8	14,6	1,41
1 m 20 à 1 m 40	24,5	15,5	

Le dispositif d'essais est constitué par 16 parcelles de 58 m², réparties dans 4 blocs de Fisher, recevant chacun 4 doses d'eau différentes. Chaque parcelle comporte 5 rangées de tomates de la variété Roma, dont la nutrition est largement prévue, par une fumure minérale complète. Les doses d'eau apportées sont calculées de la façon suivante.

La dose maximum doit satisfaire l'évapotranspiration potentielle ; elle suppose que la contribution théorique journalière du sol est nulle. Pour une période de *n* jours, elle s'exprime par :

$$I_1 = ETP_n - P_n.$$

Les trois autres doses d'irrigation doivent maintenir les réserves du sol à des niveaux plus bas, de telle sorte que pour satisfaire l'alimentation des plantes, la contribution théorique journalière du sol soit successivement égale à : 1,5 mm-2,5 mm et 4 mm. (Tableau 2).

TABLEAU 2

	q_0	q_1	q_2	q_3
Contribution théorique journalière du sol	0 mm	1 mm 5	2 mm 5	4 mm
Dose d'irrigation	I_1	I_2	I_3	I_4

$$\text{Avec } I_2 = ETP_n - (P_n + 1{,}5 \times n)$$
$$I_3 = ETP_n - (P_n + 2{,}5 \times n)$$
$$I_4 = ETP_n - (P_n + 4 \times n).$$

En principe, *n* a été fixé à 7 jours, mais pour des raisons pratiques dans la distribution de l'eau, il a été réduit à 4 jours en juillet 1959 et élargi à 11 jours en juillet 1960.

L'évapotranspiration potentielle, a été calculée d'après la formule de BOUCHET ;

$$ETP = \alpha E p \lambda(\theta)$$

dans laquelle $\alpha = 0{,}4$ en 1959

$\alpha = 0{,}37$ en 1960

Ep : évaporation en mm mesurée au Piche

$\lambda(\theta)$: une fonction des températures maxima et minima relevées sous abri pendant la période considérée.

Avant la mise en place de la culture, on a effectué un bilan des réserves en eau du sol, au moyen de sondages systématiques, jusqu'à 2 mètres de profondeur, de façon à évaluer les quantités d'eau à apporter par irrigation pour reconstituer les réserves des couches sous jacentes, jusqu'à l'humidité équivalente. Cette opération effectuée le 25 mai, lors de la mise en place de la culture, est complétée par la suite, par des arrosages uniformes sur les 16 parcelles, et des façons superficielles, pour permettre un départ normal des plants, et assurer le 25 juin une bonne couverture du sol par la végétation. A partir de cette date, on a différentié les 4 doses d'eau à apporter, selon les modalités précédemment décrites, et l'on a distribué jusqu'au début d'août, les quantités d'eau en mm évaluées ci-dessous. (Tableau 3).

TABLEAU 3

		Dose d'irrigation en mm			
		I_1	I_2	I_3	I_4
1959	25 Juin	39,30	28,80	21,80	11,30
	6 Juillet	39,52	21,52	9,52	0
	13 Juillet	48,60	38,10	31,10	20,6
	19 Juillet	42,72	33,72	27,72	18,72
	23 Juillet	39,96	33,96	29,96	23,96
	30 Juillet	30,30	19,80	12,80	2,30
	6 Août	46,30	35,80	28,20	18,30
Total 1959		286,7	211,7	161,1	95,18
1960	28 Juin	39,34	22,84	11,84	0
	6 Juillet	53,64	41,63	32,63	21,63
	18 Juillet	31,85	15,35	4,35	0
	25 Juillet	61,62	49,62	41,62	29,62
Total 1960		186,45	129,44	90,44	51,25

III, — ÉTUDE DES RENDEMENTS

Nous n'entrerons pas ici dans les détails de tous les résultats culturaux qui ont été établis à l'occasion de 11 récoltes en 1959 et 6 récoltes en 1960. Les contrôles ont porté sur les poids des fruits et leur nombre, par conséquent sur la grosseur des fruits ; en 1960, on a en outre, effectué des mesures sur l'état sanitaire des fruits à maturité. (Tableau 4).

TABLEAU 4

Rendements des fruits à l'are par dose d'irrigation.

		I_1	I_2	I_3	I_4
1959	Poids récolté en kg	693	595	526	474
	Indice	100	86	76	68
	Nombre de fruits	11 850	10 750	9 450	10 300
	Indice	100	91	80	86
1960	Poids récolté en kg	719	606	589	565
	Indice	100	83	80	78
	Nombre de fruits	14 850	12 900	13 000	12 600
	Indice	100	86	87	85
	Contribution journalière théorique du sol	$q_0 = 0$	$q_1 = 1$ mm 5	$q_2 = 2$ mm 5	$q_3 = 4$ mm

L'examen de ces données laisse apparaître une diminution progressive des rendements en poids et en nombre de fruits, parallèlement à l'augmentation de la contribution théorique journalière du sol.

En 1959, l'analyse statistique des résultats, concernant le poids des fruits et le nombre de fruits, ne permet pas la mise en évidence de différences significatives, en ce qui concerne les effets des irrigations et l'interaction irrigation × cueillettes. La variabilité du nombre de fruits (C. V. = 27 p. 100), selon les parcelles est à l'origine d'une grande part de l'erreur expérimentale. En éliminant cette part, au moyen d'une analyse de covariance [1] poids des fruits et nombre de fruits, on démasque un effet significatif des irrigations.

En conséquence, le classement des rendements parcellaires, selon les contributions théoriques du sol, distingue deux groupes : celui correspondant à $q_0 — q_1 — q_2$ — qui est supérieur à celui de q_3.

En 1960, l'analyse statistique concernant les effets des doses d'eau appliquées sur les poids des fruits, permet de distinguer les effets de l'arrosage correspondant à la contribution du sol q_0 comme significativement distincts de ceux obtenus avec q_1-q_2 et q_3. Pour P = 0,05, la plus petite différence significative est de 66 kg. Les parcelles arrosées avec la dose d'eau I_1, produisent des rendements en fruits, supérieurs à ceux des trois autres doses d'arrosage.

TABLEAU 5

Rendements par cueillette en kg à l'are.

Doses d'eau	2/8/60	17/8/60	1/9/60	23/9/60	19/10/60	Totaux par dose
I_1	31	121	330	186	51	719
I_2	34	104	283	139	46	606
I_3	40	112	280	104	54	590
I_4	49	119	231	99	65	563

Pour P = 0,05 P P d s = ± 38

[1] Nous remercions M. ARNOUX de la Station de Pathologie de Montfavet, qui a bien voulu effectuer cette étude statistique.

D'autre part, en étudiant l'interaction doses d'irrigation × cueillettes, on met en évidence l'effet positif du traitement correspondant à q_0 pour les cueillettes du 1er et 23 septembre. (Tableau 5).

La correction pour régression rendements nombre de fruits, ne modifie pas les conclusions ci-dessus.

En conséquence, l'effet positif du traitement q_0 peut être considéré comme le résultat des effets conjugués d'un nombre de fruits plus grand et d'un poids moyen également supérieur. Le résultat favorable constaté sur deux cueillettes dans les parcelles, où l'alimentation en eau a été la plus soutenue, nous permet de formuler l'hypothèse de l'importance relative de certaines irrigations pour la tomate industrielle : celles qui se situent au moment de la formation des bouquets floraux, dont les fruits arrivent à maturité entre le 1er et 23 septembre et qui seront à même

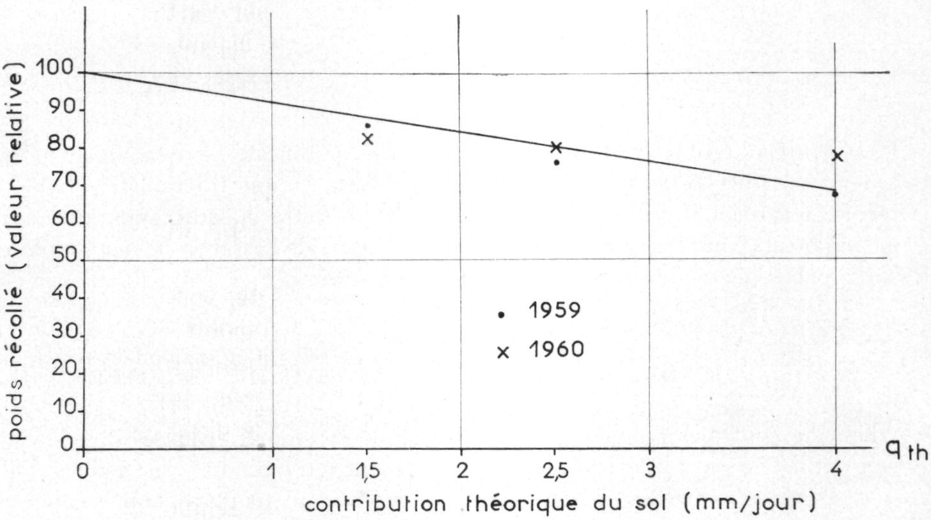


FIG. 1.

d'influencer efficacement les rendements. La notion de « périodes critiques » pour les arrosages de la tomate, semble être ici mise en évidence. On notera que la production des cueillettes du 1er et 23 septembre, représentent 71 p. 100 du rendement total.

Dans le tableau 4, on a exprimé les rendements en valeur relative, en fonction de la contribution journalière théorique q.

On constate que les rendements diminuent rapidement lorsque la contribution théorique journalière est de $q_1 = 1{,}5$ mm ; cette perte de poids variant de 14 à 17 p. 100 selon les années. Le graphique 1 rend compte de la relation qui lie le rendement au déficit théorique du sol. Cependant, il est intéressant de noter que des apports d'eau réduits correspondant aux déficits théoriques du sol de 4 mm (c'est-à-dire dans le cas présent, à des apports d'eau représentant 30 p. 100 de l'évapotranspiration potentielle calculée), sont susceptibles de produire près de 70 p. 100 du rendement maximum.

Afin de compléter l'étude des effets produits par l'insuffisance ou l'irrégularité de l'alimentation en eau de la plante, on a contrôlé les dégâts sur fruits apparaissant sous forme de Blossom end rot. (Tableau 6).

TABLEAU 6

Nombre de fruits nécrosés

Dates des ceuillettes......	Doses d'irrigation			
	I_1	I_2	I_3	I_4
2/8	10	4	7	53
17/8	24	4	38	240
1/9	16	5	70	185
23/9	0	0	0	0
Total par doses d'eau	50	12	115	478

Le pourcentage de fruits atteints de nécrose ombilicale, et dénombrés principalement au cours de trois cueillettes, ne représente qu'une fraction très faible de la récolte totale en fruits (cf. tableau 4). L'effet de cette maladie apparaît comme d'une importance minime pour l'ensemble des résultats de l'essai, et ne peut expliquer les différences de rendements des récoltes constatées.

IV. — ÉTUDE DE LA TENEUR EN EAU DES FEUILLES

Afin de contrôler l'alimentation hydrique de la plante, pour les diverses irrigations utilisées, on a effectué des mesures du taux d'humidité des feuilles. On a aussi cherché à voir si les pertes en eau, au niveau du feuillage sont compensées de façon durable par les apports d'eau au sol. Ce second point peut être relié dans la pratique au problème du rythme des irrigations que le dispositif expérimental ne permettait pas d'étudier.

Les mesures sont effectuées dans des conditions aussi reproductibles que possibles, compte tenu des facteurs suivants : position de la feuille sur la plante, nombre de feuilles, dimensions, heure du prélèvement, à des dates généralement choisies avant et après les irrigations.

Les résultats obtenus sont reportés sur le graphique n° 2, qui donne en fonction du temps, la variation du taux d'humidité des feuilles pour chacune des doses d'irrigation appliquée.

Ces courbes mettent en évidence deux facteurs distincts : la décroissance du pourcentage d'humidité du matériel végétal, en fonction de la constribution théorique du sol ; cet effet est reporté sur le graphique n° 3. Compte tenu de l'erreur expérimentale, on peut considérer qu'il existe à un instant donné une relation entre le taux d'humidité des feuilles et la contribution théorique du sol. Le second facteur est la variation dans le temps du taux d'humidité, compte tenu des dates d'arrosage.

Pour la dose I_1, les apports du 6 et 18 juillet, maintiennent à la même heure,

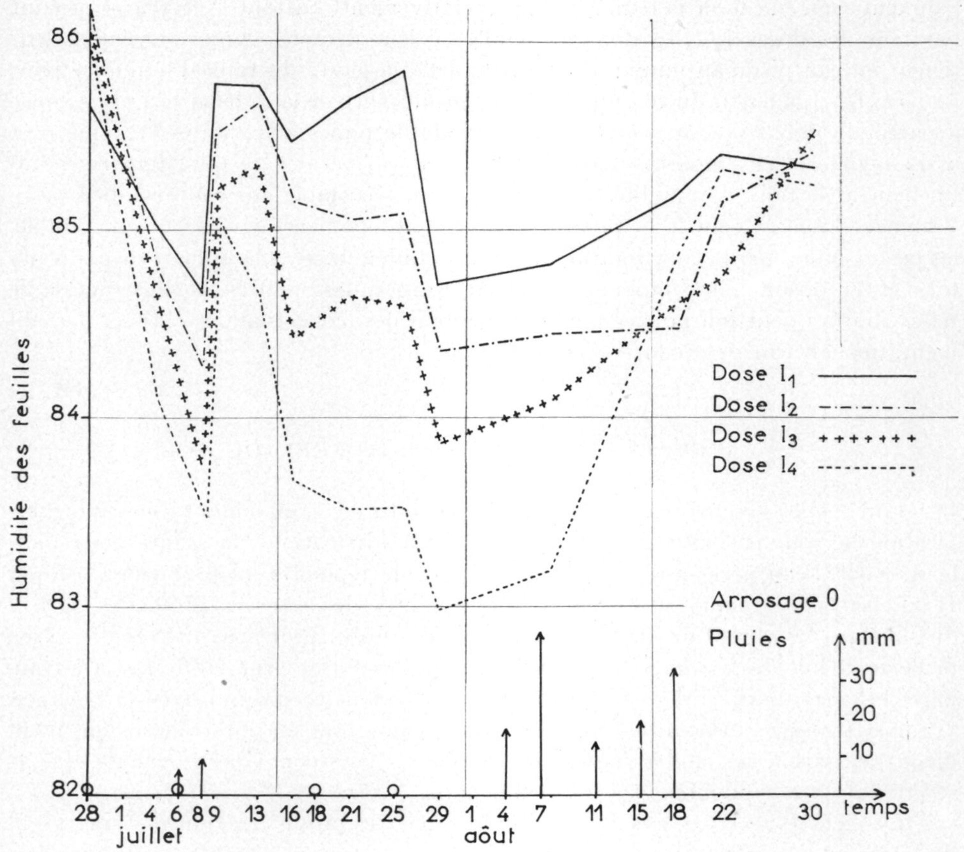

86
85
84
83
82
Humidité des feuilles
Dose I1
Dose I2
Dose I3
Dose I4
Arrosage 0
Pluies
mm
30
20
10
28 1 4 6 8 9 13 16 18 21 25 29 1 4 7 11 15 18 22 30
temps
juillet
août

FIG. 2.

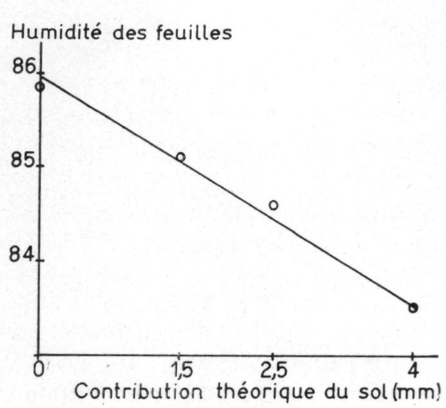

Humidité des feuilles
86
85
84
0
1,5
2,5
4
Contribution théorique du sol (mm)

FIG. 3.

l'alimentation en eau de la feuille de façon relativement constante ; ceci ne se produit pas pour les doses I_2-I_3-I_4, dont les feuilles voient décroître progressivement leur teneur en eau jusqu'au minimum du 29 juillet. La chute du taux d'humidité pour les parcelles I_1 à partir du 26 juillet, reflète l'insuffisance de la cadence des irrigations ; à partir du début d'août, s'établit une période de pluies abondantes (127 mm), et assez régulièrement réparties dans le temps, ce qui permet de faire remonter graduellement le taux d'humidité des feuilles, pour l'ensemble des traitements I_1 à I_4. L'alimentation en eau de la plante par le sol ne compense pas de façon durable, les pertes subies par la transpiration au niveau du feuillage. A la lumière de ces résultats, et, en raison de la simplicité dans la réalisation des mesures, la construction de telles courbes peut fournir des renseignements utiles, concernant le rythme de l'alimentation en eau des plantes maraîchères.

V. — ÉVALUATION DU DÉFICIT RÉEL DU SOL

Lorsque les besoins maxima en eau d'une culture correspondant à l'évapotranspiration ne sont pas satisfaits par les pluies et les irrigations, la plante puise dans le sous-sol, l'eau nécessaire à ses besoins, Afin de répondre au problème posé par HALLAIRE, concernant l'utilisation par les plantes des réserves profondes en eau du sol dans les conditions naturelles, on a mesuré des profils hydriques du sol en place au début des arrosages différentiés à après la fin de ceux-ci, de façon à comparer les contributions réelles du sol aux contributions théoriques fixées à l'avance.

Les arrosages différentiés commencés le 25 juin, ont été interrompus au début d'août, en raison des chutes successives de pluies. Les seconds prélèvements de sols, se situent le 6 septembre, soit 77 jours après.

Les déficits réels Dr, calculés en mm, à partir des profils hydriques, s'établissent de la façon suivante, pour des couches de sol de 0,20 mm d'épaisseur jusqu'à 2 m de profondeur : (tableau 7).

TABLEAU 7

	Doses d'irrigation			
	I_1	I_2	I_3	I_4
Déficit total réel sur 2 m .	33,7	36,0	45,9	75,5
Contribution réelle journalière q_r	0,43	0,46	0,59	0,98
Contribution théorique journalière q_{th}	0	1,5	2,5	4

Ces valeurs permettent de calculer la contribution journalière réelle q_r que l'on compare à la contribution fixée à l'avance : q_{th}. La contribution réelle journalière apparaît systématiquement inférieure à la contribution théorique, ce qui signifie que les couches profondes du sol ont livré aux plantes, des quantités d'eau plus faibles que celles qui étaient escomptées. La différence entre le déficit réel et le déficit théorique qui traduit en fait le déficit d'alimentation en eau subi par la culture,

est bien en accord avec la réduction des rendements des fruits, et des teneurs en eau des feuilles précédemment exposée. Quelque soit le déficit théorique fixé, on cons tate que la contribution journalière du sol est faible.

CONCLUSION

Les principaux résultats expérimentaux contrôlés sur une culture de tomates industrielles, soumise à des arrosages différentiés, mettent en évidence les divers points suivants :

Cette espèce sensible à l'irrigation, présente des « périodes critiques » pendant lesquelles le rendement final en fruits peut être influencé ; les arrosages agissent sur deux facteurs de la production : le nombre de fruits et le poids de ceux-ci ; ce qui laisse supposer l'existence de deux périodes primordiales à envisager : celle de la formation des bouquets floraux, dont les fruits parviendront à maturité de la mi-août à la mi-septembre pour la variété Roma, et le stade grossissement des fruits pour cette même période, stades pendant lesquels l'irrigation devra être soigneusement conduite. Il est probable d'après nos observations, qu'il existe un troisième stade, se situant immédiatement après le repiquage des plants, mais le protocole d'essai n'était pas prévu pour le mettre en évidence de façon indiscutable. Il paraît souhaitable de fournir à la tomate industrielle des doses d'irrigation telles que la contribution théorique du sol soit aussi faible que possible, pour les raisons que nous venons d'énoncer et par suite des faibles risques existant alors pour l'apparition de la maladie physiologique du blossom end rot. Mais pour des doses d'irrigation atteignant 30 p. 100 de l'évapotranspiration calculée, les rendements en fruits peuvent encore atteindre 70 p. 100 de l'optimum.

Parmi les résultats fondamentaux étudiés, on a montré que les courbes des teneurs en eau des feuilles étaient liées aux contributions théoriques du sol, et, qu'à un instant donné, il existait une relation entre ces deux variables ; d'autre part, la plante ne compense pas de façon durable les pertes d'eau subies par transpiration au niveau du feuillage ; ce problème paraît en liaison étroite avec celui du réglage des rythmes des irrigations. On a mis aussi en évidence, le fait que la contribution réelle du sol est inférieure à la contribution théorique, ce qui traduit le déficit possible d'alimentation en eau de la plante.

Reçu pour publication en novembre 1960.

RÉSUMÉ

Au cours d'une expérimentation conduite au champ, sur une culture de tomates industrielles, on a étudié l'influence sur la plante et le sol de quatre niveaux d'alimentation en eau. Les doses d'eau appliquées et calculées à partir d'une formule climatique de l'évapotranspiration potentielle, sont prévues de façon à ce que le sol fournisse aux plantes, des contributions théoriques croissantes de 0 à 4 mm par jour, à partir de ses réserves. D'après les bilans de sols en place, on a mis en évidence que la contribution réelle du sol est inférieure à la contribution théorique, ce qui peut se traduire par un déficit d'alimentation en eau de la plante.

En ce qui concerne les effets des irrigations, vis-à-vis de la culture, les doses appliquées au cours des deux périodes critiques principales du cycle végétatif, agissent favorablement sur les facteurs du rendement final : grosseur et nombre de fruits. On note, cependant un rendement en fruits s'élevant à 70 p. 100 de l'optimum, lorsque les volumes d'eau fournis, atteignent seulement 30 p. 100 du volume maximum utilisé.

On a monté d'autre part, qu'il existe à un instant donné une relation entre la teneur en eau des feuilles de la culture et la contribution théorique du sol ; cette relation est susceptible de faciliter le réglage du rythme des irrigations.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 109-119.

631. 811. 91

LES BESOINS EN EAU RÉELS DES CULTURES ET LES POSSIBILITÉS D'UTILISATION DES RÉSERVES D'EAU DU SOL EN TUNISIE. INFLUENCE DE LA SALURE

J. DAMAGNEZ et O. de VILLELE
Section de Bioclimatologie, Service botanique et agronomique de Tunisie, Ariana.

I. — INTRODUCTION

Pour une situation climatique donnée, l'évapotranspiration potentielle représente le maximum de la consommation d'eau des plantes. C'est une donnée essentiellement physique qui correspond à la quantité maximum d'énergie, d'origine solaire, disponible pour l'évaporation ou la transpiration végétale.

Dans les régions arides chaudes, les besoins en eau maximum ainsi définis sont très importants et ne sont que rarement couverts par la pluviosité. En Tunisie, le bilan hydrique estival, calculé sur une consommation d'eau maximum théorique des cultures égale à l'évapotranspiration potentielle, est toujours très largement déficitaire. Toute culture intensive nécessite donc ici un apport d'eau complémentaire par l'irrigation.

La dose d'irrigation maximum serait a priori au plus égale à l'évapotranspiration potentielle, en l'absence de pluie et de réserves d'eau dans le sol, mais les besoins réels en eau d'irrigation d'une culture, dans un périmètre irrigué, sont très certainement inférieurs à ce maximum.

En effet, si le rendement maximum correspond le plus souvent à la dose d'irrigation maximum, économiquement, le rendement optimum sera obtenu grâce à une utilisation de l'eau d'irrigation rationnellement ménagée, pour une consommation réelle d'eau inférieure à l'évapotranspiration potentielle.

Dans ce cas, les doses d'irrigation étant réduites, la plante est obligée de prélever, dans les réserves d'eau naturelles du sol,une partie de l'eau qui lui est nécessaire.

Un des buts de cette expérimentation est d'étudier dans quelle mesure il est possible, compte tenu de la pluviosité, de réduire la dose d'irrigation, et quelle peut être, pour une contribution théorique du sol à l'alimentation hydrique des plantes fixée, sa contribution réelle (1).

En Tunisie, les ressources en eau d'irrigation sont très limitées et l'irrigation n'est possible qu'avec des eaux de qualité bien souvent médiocre ; la teneur moyenne en sels des eaux d'irrigation est de 2 à 3 gr /l, même certaines eaux de forage du Sud Tunisien ont des extraits secs atteignant 6 à 7 gr /l. Dans ces conditions il était nécessaire de rechercher, parallèlement, les incidences de la salure des eaux sur la consommation d'eau des plantes et sur l'évolution pédologique des sols[1]. Les sels contenus

dans l'eau d'irrigation, risquent en effet de s'accumuler dans le sol et d'atteindre une concentration qui peut devenir rapidement critique et entrainer des phénomènes de toxicité si celui-ci n'est pas soumis à un lessivage périodique ou si les eaux de drainage ne peuvent s'éliminer. Par ailleurs, les sels contenus dans l'eau d'irrigation lui confèrent une certaine pression osmotique équivalente, dans son effet, à un accroissement du potentiel capillaire de l'eau dans le sol.

Les études entreprises depuis 1959, par la Section de Bioclimatologie du Service Botanique et Agronomique de Tunisie, ont porté sur les besoins en eau des cultures annuelles (sorgho, maïs, coton) et des cultures arbustives (orangers, oliviers), irriguées soit à l'eau douce, soit à l'eau salée. Trois parcelles expérimentales (Tunis-*Centre de l'eau*, Sfax-*Melloulèche* et Gabès *Aïn-Zerig*) réparties en zone littorale, sur un axe Nord-Sud, ont été choisies de manière à disposer d'un ensemble de zones climatiques distinctes[2].

Les caractéristiques des eaux utilisées dans les différentes parcelles expérimentales sont indiquées sommairement au Tableau 1. Les eaux, qui ont été retenues pour ces essais, sont représentatives de la moyenne des eaux d'irrigation utilisées en Tunisie.

TABLEAU I

Composition des eaux d'irrigation utilisées dans les parcelles expérimentales.

	Tunis		Sfax (Melloulèche) eau salée : (forage)	Gabès (Aïn Zerig) eau salée (forage)
	eau douce	eau salée (puits)		
Extrait sec mg/l	195	2 680	4 000	2 880
Conductivité mmhos/cm	0,31	4,5	6,7	3,8
Teneur en chlore mg/l	43	1 118	1 686	0,639
Pression osmotique atm	0	1,65	2,7	1,32

Seule la comparaison des besoins en eau des cultures annuelles maïs (variété IOWA 44-17) et coton (var. PIMA 67) sera faite ici à titre d'exemple.

II. — PRINCIPE DES ESSAIS ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Définitions

Pour une période considérée de N jours, les besoins d'eau maximums de la culture sont définis par l'évapotranspiration potentielle (ETP). Si ces besoins doivent être couverts en totalité, ils pourront l'être pour une partie par des irrigations I et les pluies P, pour le reste par l'exploitation des réserves en eau du sol, dont le déficit théorique doit varier de ΔD_{th} *Théorique*

$$ETP = I + P + \Delta\bar{D}_{th}.\ mm.$$

(1) L'étude de l'évolution des sols soumis à l'irrigation avec des eaux salées a été faite à Tunis et Gabès par le Service Pédologique de Tunisie : J. P. Cointepas et P. Roederer : Premiers résultats de l'évolution de la salure dans un périmètre irrigué à l'eau salée. *Ann. Agron.* (même numéro)

(2) Au fur et à mesure des possibilités techniques offertes par le Service Botanique et Agronomique de Tunisie des implantations de parcelles expérimentales seront faites pour des climats de caractère plus continental,

La contribution du sol, à l'alimentation hydrique maximum de la culture à son ETP, est alors :

$$\Delta\overline{D}_{th.} = ETP - (I + P)\ mm.$$

La contribution journalière théorique du sol :

$$q_{oth} = \frac{\Delta\overline{D}_{th.}}{N} = \frac{ETP - (I + P)}{N}\ mm/jour$$

La dose d'irrigation maximum est celle qui assure la totalité du besoin maximum de la culture :

$$I_{max.} = ETP - P\ mm.$$

Dans ces conditions l'on a :

$$\Delta\overline{D}_{th} = O \quad \text{et} \quad q_{oth} = O$$

Si l'on réduit l'importance des irrigations, corrélativement la contribution théorique du sol augmente. Si la culture ne peut pas prélever dans le sol le complément de ses besoins théoriques, la contribution réelle du sol ΔD_r est inférieure à la contribution théorique ΔD_{th} ; de même la consommation effective en eau de la culture ou évapotranspiration réelle ETR est inférieure à ETP.

$$ETR = I + P + \overline{\Delta D}_r.\ mm$$

Principes d'études

Nous voulons connaître les possibilités de contribution du sol à l'alimentation hydrique de la culture. Pour cela différentes contributions journalières théoriques du sol q_{oth} sont fixées arbitrairement et les différentes doses d'irrigation sont alors calculées à partir de ces valeurs :

$$I = ETP - P - n \times q_{oth}.$$

n = nombre de jours qui séparent 2 irrigations successives.

A la fin de la période d'irrigation on mesure la variation de déficit en eau du sol entre le début et la fin de l'expérience, ΔD_r. De cette valeur qui représente la contribution effective du sol, on déduit la contribution journalière réelle q_{or}.

Ces valeurs permettent ensuite de calculer les valeurs de la consommation d'eau effective de la culture ETR, pour les différentes doses d'irrigation ainsi calculées. On peut ensuite étudier dans quelle mesure les rendements sont affectés par une réduction de l'alimentation hydrique.

Dispositif expérimental

Les dispositifs expérimentaux adoptés sont des dispositifs classiques : carré latin à 4 traitements ou blocs à 5 traitements et 4 répétitions ; chaque traitement correspond à une dose d'irrigation calculée à partir d'une valeur différente de la contribution journalière théorique ($q_{oth.}$).

En Tunisie, les valeurs journalières de l'évapotranspiration potentielle pouvant atteindre 6 mm en Mai et 8 mm en Juillet-Août, les valeurs arbitraires de la

contribution journalière théorique du sol ont été fixées de la manière suivante :

Traitement A	q_{oth}	$= 0\ mm/j$
— B		$= 1$
— C		$= 2$
— D		$= 4$
— E		$= 6$

Les irrigations ayant lieu tous les 7 jours, les doses d'irrigation sont données par :

$$I\ mm = (ETP)_7 - (P)_7 - 7 \times q_{oth}.$$

$(ETP)_7$ et $(P)_7$ représentent l'évapotranspiration potentielle mesurée et les pluies pendant les 7 jours précédant l'irrigation.

III. — RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

1. — Comparaison de l'ETP d'une culture de maïs a celle d'un évapotranspiromètre (Kikuyu). Influence de la salure.

Avant d'étudier les possibilités de contribution du sol à l'alimentation en eau d'une culture, il était nécessaire de s'assurer que la consommation d'eau maximum correspondait bien à l'ETP. En 1960 cette comparaison a été faite à Tunis pour le maïs.

Quatre cases lysimétriques situées au milieu de la parcelle expérimentale ont été irriguées en excès, deux à l'eau douce, deux à l'eau salée ; le bilan hydrique du maïs ainsi mesuré a bien la signification d'une mesure d'évapotranspiration potentielle si on prend la précaution de s'assurer que le stock d'eau du sol des cases lysimétriques est le même au début et à la fin de l'essai. Cette donnée peut donc être comparée à la valeur de l'ETP mesurée sur gazon de kikuyu pendant la même période.

TABLEAU 2

Evapotranspiration potentielle et consommation d'eau maximum du maïs en case lysimétrique

	Eau douce		Eau salée	
	Case I	Case II	Case I	Case II
Consommation d'eau du maïs, du semis à la récolte — ETP maïs mm	649	625	535	565
Évapotranspiration potentielle mesurée — ETP kikuyu mm	605	605	605	605
$\frac{\text{ETP maïs}}{\text{ETP kikuyu}}$	1,07	1,03	0,88	0,95
	1,05		0,91	

Les valeurs obtenues pour la consommation d'eau maximum de la culture de maïs encadrent bien la valeur de l'évapotranspiration potentielle mesurée.

Le fait d'obtenir, *à l'eau douce*, des valeurs légèrement supérieures à celle de l'évapotranspiration potentielle peut être attribué, en première analyse, à un *effet* oasis sur le maïs qui atteignait 2 mètres de hauteur.

En effet, pour que l'effet oasis soit négligeable, il aurait fallu que le périmètre irrigué soit de dimensions infinies ; ce qui n'est évidemment pas le cas. Toutefois l'effet oasis devrait se manifester de la même façon sur l'évapotranspiromètre puisque son périmètre de protection est délimité.

Mais comme cet effet traduit un apport advectif d'énergie qui, toutes choses égales, est proportionnel au transport horizontal d'énergie, donc au vent, il est d'autant plus intense que la vitesse du vent est plus élevée. Au voisinage de la surface du sol la décroissance du vent avec l'altitude est logarithmique ; il est donc normal de noter un effet oasis plus marqué sur un maïs de 2 mètres que sur un gazon de kikuyu de quelques centimètres de haut.

A *l'eau salée*, la consommation d'eau maximum du maïs est réduite d'environ 10 p. 100 par rapport au maïs cultivé à l'eau douce.

Les besoins en eau maximum d'une culture de maïs sont très voisins de l'évapotranspiration potentielle. L'ETP paraît donc bien, en première approximation, indépendante de la nature de la plante, pourvu que celle-ci assure une couverture végétale continue.

Si l'eau est en quantité suffisante, la culture consommera, quel que soit son stade physiologique, la quantité d'eau maximum correspondant à l'ETP, donnée essentiellement climatique.

2. — Contribution du sol a l'alimentation en eau des cultures

Influence de la dose d'irrigation sur l'exploitation des réserves d'eau du sol

Les besoins d'eau maxima des cultures étant sensiblement égaux à l'évapotranspiration potentielle (ETP) on peut étudier dans quelle mesure la culture peut trouver, dans les réserves naturelles du sol, l'eau nécessaire à ses besoins. Ceci revient à comparer les contributions journalières réelles (q_{or}) observées aux contributions journalières théoriques (q_{oth}) fixées a priori dans les différents périmètres expérimentaux étudiés (tableau 3 et graphique 1, courbes D, E et F).

L'examen de ce graphique montre que la contribution réelle du sol est systématiquement inférieure à la contribution théorique fixée a priori, sauf dans le cas du traitement A ($q_{oth} = 0$) où la culture est conduite à l'ETP. Cela revient à dire que, dès que la culture est obligée de prélever une partie de l'eau nécessaire à ses besoins dans les réserves d'eau du sol, la consommation d'eau effective de la culture ou évapotranspiration réelle, ETR, devient inférieure à l'ETP.

Il est remarquable de noter que la relation entre la contribution théorique du sol q_{oth} et la contribution réelle q_{or}, semble être linéaire dans tous les cas.

La pente de la droite montre que, quelle que soit la contribution théorique (q_{oth}) fixée, la contribution réelle du sol (q_{or}) est avec elle dans un rapport constant inférieur à 1.

TABLEAU 3

Contribution journalière réelle du sol q_{or} pour différents régimes hydriques et différents degrés de salure de l'eau d'irrigation

Traitement	A	B	C	D	E	Conductivité de l'eau d'irrigation mmhos/cm
q_{oth} mm/jour	0	1	2	4	6	
q_{oth} (1)	*0,18*	*1,15*	*2,06*	*4,02*	*5,92*	
Tunis (1/6-6/8)						
eau douce q_{or}	0,81	1,03	1,60	2,28	1,96	0,31
eau salée q_{or}	0,25	0,54	0,89	1,55	2,14	4,5
q_{oth}(1)	*0,93*	*1,74*	*2,55*	*4,17*		
Gabès-(24/5-6/8)						
q_{or}	1,02(2)	0,82	0,97	1,73		3,8
q_{oth}(1)	*1,1*	*1,9*	*2,8*	*4,3*		
Sfax (4/7-17/8)						
q_{or}	0,13	0,32	—	1,1		6,7

(1) Dans la pratique, il a été impossible de respecter exactement les valeurs de q_{oth} fixées en début d'essai. L'évapotranspiromètre de Gabès et Sfax ayant été arrosé avec de l'eau salée, il était en particulier nécessaire de leur appliquer une correction systématique et de majorer de 10 p. cent les valeurs de l'ETP mesurée dans ces deux stations. Les valeurs de q_{oth} qui ont été réellemeut appliquées sont mentionnées *en italique.*

(2) Cette valeur élevée de q_{or} est peut-être due à un léger lessivage qui tend à en augmenter la valeur.

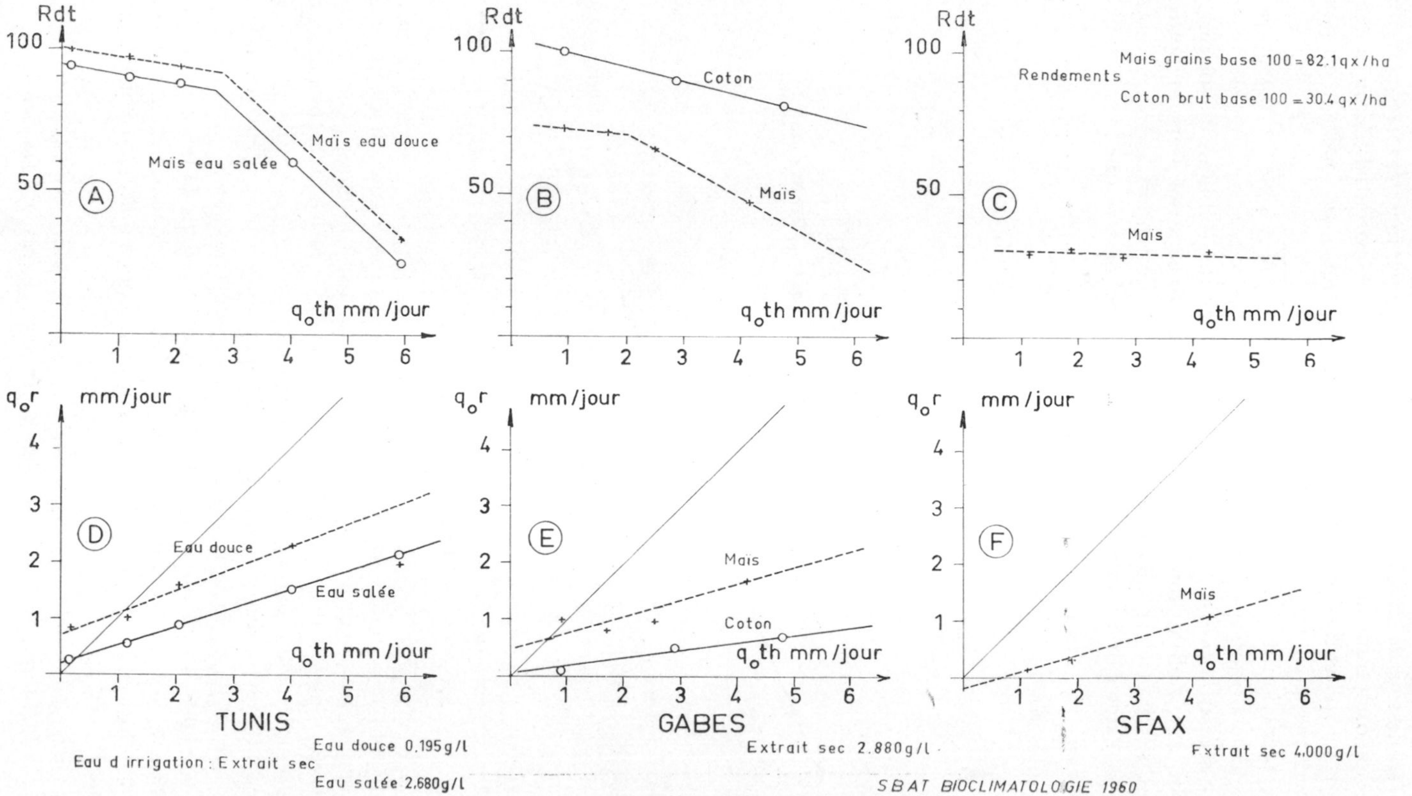
Il faut toutefois noter que dans le cas du maïs cultivé à l'eau douce (graphique 1, courbe D) l'ordonnée à l'origine non nulle traduit le fait, déjà mis en évidence en case lysimétrique, d'un effet oasis plus marqué sur le maïs que sur le gazon de kikuyu et d'une consommation d'eau maximum de cette culture supérieure à l'évapotranspiration potentielle mesurée sur gazon.

Influence de la salure de l'eau d'irrigation sur la consommation d'eau des cultures

L'effet de la salure apparaît nettement par une réduction de la contribution réelle du sol q_{or} et de la consommation d'eau des plantes dès que celles-ci se trouvent en présence de sel.

Ainsi, dans le cas de la culture de maïs, la réduction de la contribution réelle du sol est d'autant plus prononcée que le degré de salure des eaux est plus élevé. Connaissant la concentration et la composition de l'eau d'irrigation il est possible de calculer la pression osmotique de ces eaux (tableau 1) et de tracer la courbe (graphique 2) qui donne la relation entre la pression osmotique de l'eau et la contribution journalière réelle du sol pour une valeur déterminée de la contribution théorique. L'ajustement des points expérimentaux sur la courbe est satisfaisant.

L'analyse de cette courbe montre qu'au delà d'une pression osmotique de l'eau d'irrigation de 3 atm. (c'est-à-dire pour une eau de conductivité supérieure à 7 mmhos/cm) les possibilités d'exploitation des réserves d'eau du sol deviennent très faibles. Ceci est très certainement dû, en dehors des phénomènes de toxicité spécifique des ions en solution, à ce que dans ce cas une faible variation du taux d'humi-



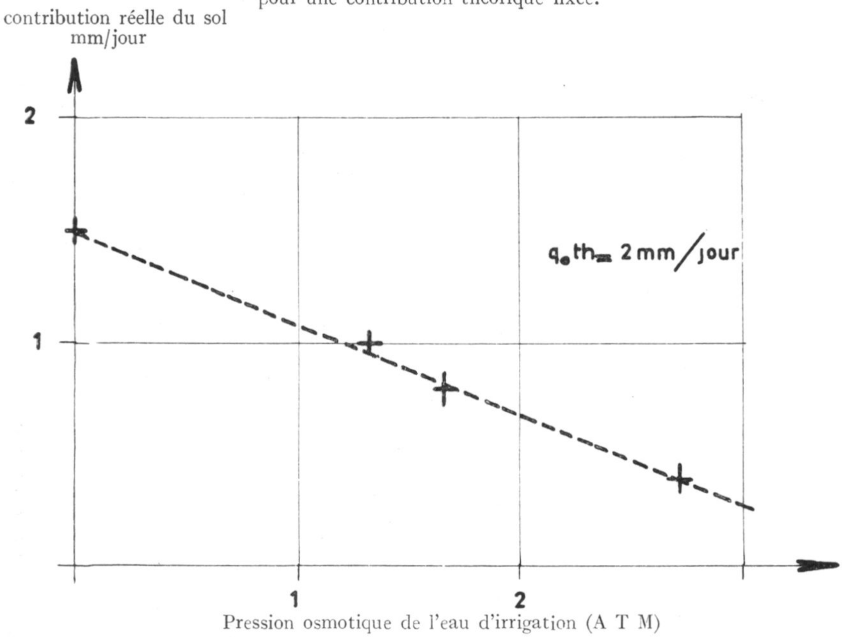
GRAPH. I — Rendement et consommations d'eau effectives des cultures de maïs et de coton.

dité du sol en-dessous de la capacité au champ, se traduit par une très forte augmentation de la pression osmotique des solutions du sol et amène le potentiel thermodynamique de l'eau du sol (potentiel capillaire + pression osmotique) au voisinage du point de flétrissement permanent (pF = 4,2).

Cette réduction de la contribution réelle du sol par rapport à la contribution théorique fixée a priori, conduit à formuler deux hypothèses :

1° Le sel par la pression osmotique qu'il confère aux solutions du sol, produit le même effet que celui des forces de succion de l'eau dans le sol. Cette hypothèse ne semble pas devoir être cependant la seule retenue, car le rapport $\alpha = q_{or}/q_{oth}$, trouvé constant pour une eau de concentration en sel donnée, montre que l'exploitation des

GRAPH II. — Pression osmotique de l'eau d'irrigation et contribution réelle du sol pour une contribution théorique fixée.



réserves du sol par la plante semble indépendante de l'importance de ces réserves, et par conséquent, du potentiel capillaire proprement dit. Toutefois, pour des taux de salures élevés, l'augmentation de pression osmotique, provoque sans aucun doute une réduction de la consommation d'eau de la culture.

2° Les plantes se développant dans un milieu « salé » présentent des différences de comportement physiologique. Selon certains auteurs cités par KRAMER (2) il semble bien que la salinité du sol entrave le développement et réduise la perméabilité à l'eau des racines par suite d'une action toxique. Le système radiculaire étant moins développé, l'exploitation de l'eau du sol par la plante est alors réduite, ainsi que l'a montré récemment M. HALLAIRE (3).

Adaptation physiologique des différentes espèces à l'eau salée

On va comparer maintenant pour le périmètre expérimental Gabès-Aïn Zerig (graphique 1, courbe E et tableau 4) le comportement du maïs et du coton

(var. Pima). L'analyse de ces deux courbes montre que pour, un même taux de salure de l'eau (extrait sec = 2,880 g/l) et un régime hydrique identique, la consommation d'eau du coton, c'est-à-dire son évapotranspiration réelle, est encore réduite par rapport à celle du maïs. Pour le maïs le rapport $\alpha = q_{or}/q_{oth}$ de la contribution réelle du sol à la contribution théorique fixée a priori est encore de 0,5 ; dans le cas du coton , ce même rapport est beaucoup plus faible et égal à 0,15.

TABLEAU 4

Contribution journalière réelle du sol et rendements d'une culture de coton (Pima 67) pour différents régimes hydriques

Gabès (Aïn Zerig) 1/7 — 6/9/1960

Traitement		A	C	D
q_{oth} (1)	mm/jour	0 *0,9*	2 *2,9*	4 *4,8*
q_{or}	mm/jour	0,12	0,52	0,73
Rendement brut	qx/ha	30,4	26,9	24,4
	val. rel	*100*	*90*	*81*

(1) Dans la pratique, il a été impossible de respecter exactement les valeurs de q_{oth} fixées en début d'essai. Les valeurs de q_{oth} qui ont été réellement appliquées sont mentionnées *en italique*.

Par ailleurs en considérant les courbes de rendement de ces deux cultures (maïs et coton) (graphique 1, courbe B) il ne semble pas que les réductions de consommation d'eau du coton par rapport à celle du maïs correspondent à une action toxique des ions en solutions sur la physiologie de la plante, car le rendement brut du coton atteint, en effet, 30,4 qx/ha. Ce rendement est comparable au rendement maximum du maïs à Gabès, soit 59,5 qx/ha.

Bien qu'il soit difficile, compte tenu du faible nombre de données expérimentales dont on dispose et, en particulier, de l'absence de données sur la consommation d'eau du coton cultivé à l'eau douce, de pousser l'analyse de ces résultats d'un point de vue théorique, on peut cependant noter une meilleure adaptation à l'eau salée du coton que du maïs, puisque sa consommation d'eau est fortement réduite sans que les rendements en paraissent affectés. De nouvelles expériences seront faites en 1961 à Tunis pour étudier l'influence de la salure sur la consommation d'eau du coton.

III. — Influence sur les rendements d'une réduction de l'alimentation hydrique

La consommation d'eau réelle d'une culture, c'est-à-dire son évapotranspiration réelle, devient donc inférieure à l'évapotranspiration potentielle dès que la plante est amenée à prélever dans le sol, même en très petites quantités, une partie de l'eau nécessaire à ses besoins. Voyons maintenant quelle est l'influence de cette diminution de la consommation d'eau, ou ce qui revient sensiblement au même dans le cas d'une

culture couvrante, de la réduction du taux de transpiration des plantes sur le rendement (tableau 5).

TABLEAU 5

Contribution en eau théorique du sol et rendements d'une culture de maïs (Iowa 44-17) cultivé à l'eau douce et à l'eau salée.

Traitement			A	B	C	D	E
q_{oth} mm/jour			0	1	2	4	6
Tunis	eau douce	qx/ha	82,1	79,5	76,8	42,2	28,3
		val. rel	*100*	*97*	*94*	*51*	*34*
	eau salée	qx/ha	76,8	73,1	72,2	49,3	20,7
		val. rel	*94*	*90*	*88*	*60*	*25*
Gabès	eau salée	qx/ha	59,5	59,1	54,1	38,4	
		val. rel	73	72	66	47	
Sfax	eau salée	qx/ha	23,5	25,2	22,8	24,7	
		val. rel	*29*	*31*	*28*	*30*	

Dans le cas du maïs cultivé à *l'eau douce*, le rendement maximum en grains (base 100 = 82,1 qx/ha) est obtenu pour une consommation d'eau maximum correspondant sensiblement, compte tenu de l'effet oasis, à l'évapotranspiration potentielle.

Au fur et à mesure que la contribution journalière théorique du sol doit s'accroître et que la consommation d'eau réelle de la culture diminue, la baisse de rendement correspondante est tout d'abord faible : statistiquement aucune différence significative ne peut être mise en évidence jusqu'à des contributions journalières théoriques voisines de 2 à 3 mm/jour. Ce n'est que pour des contributions théoriques supérieures que la réduction de rendement devient sensible. Ainsi pour une contribution de 6 mm/j (traitement E), le rendement n'est plus que de 34 p. 100 du rendement maximum.

Ces résultats sont comparables à ceux obtenus en 1959 dans le cas d'une culture de sorgho fourrager cultivé à l'eau douce (1), toutefois la diminution du rendement du maïs, pour une valeur de q_{oth} supérieur à 3 mm/jour, apparaît ici plus brutale puisque le rendement du sorgho fourrager en matière sèche totale à $q_{oth} = 6$ mm/j était encore de 57 p. 100 par rapport au rendement maximum.

A l'eau salée, les rendements sont systématiquement plus faibles. A Tunis, les différences de rendement entre le maïs cultivé à l'eau douce et à l'eau salée ne sont toutefois pas significatives (tableau 5). Les chutes de rendements sont beaucoup plus prononcées pour Gabès et Sfax, mais les rendements de ces deux parcelles sont difficilement comparables avec les rendements obtenus à Tunis ; pour ces deux périmètres la fertilité des sols est en effet beaucoup plus faible.

CONCLUSIONS

De cette première expérimentation sur les besoins en eau des cultures en Tunisie on peut tirer un certain nombre d'enseignements agronomiques :

1° La consommation d'eau maximum de différentes cultures est sensiblement

la même, compte tenu de l'effet oasis, et est égale à l'évapotranspiration potentielle si la *culture est couvrante.*

2° Il est possible d'affirmer que la consommation des plantes irriguées à l'eau salée est fortement réduite sans que le rendement soit affecté dans les mêmes proportions. A Tunis, pour le maïs, la réduction est de 10 p/100.

3° Il paraît inutile dans le cas d'irrigation avec des eaux douces ou peu salées, de se placer dans les conditions d'alimentation maximum en eau pour atteindre le rendement optimum.

Enfin pour des eaux d'irrigation relativement mal équilibrées et à un taux de salure élevé on peut poser l'hypothèse de travail suivante : est-il nécessaire, ainsi qu'il en est coutume, de majorer systématiquement de 30 p. 100, la dose d'eau à chaque irrigation, pour assurer un lessivage permanent? Cela conduit, en effet, à des quantités d'eau importantes.

Par ailleurs les formules empiriques de calcul des besoins en eau des cultures, telles que celles de BLANEY et CRIDDLE ou HARGREAVES, qui sont fréquemment employées, conduisent en zones arides chaudes à l'estimation d'une dose d'irrigation inférieure à l'évapotranspiration potentielle mesurée. Dans ces conditions la dose globale ainsi calculée se trouve insuffisante pour assurer un lessivage correct, surtout si le réseau de drainage est implanté trop profondément, c'est-à-dire si la masse du sol à lessiver est trop grande. Ne pourrait-on au contraire se contenter d'apporter une, deux, trois ou même quatre fois par année, suivant l'évolution de la salure du sol, une dose de lessivage massive, en la faisant coïncider de préférence avec une pluie pour réduire le taux de salure de l'eau?

Reçu pour publication en novembre 1960.

RÉSUMÉ

Les recherches conduites par la Section de Bioclimatologie du Service Botanique et Agronomique de Tunisie sur la détermination des besoins en eau des cultures irriguées à l'eau douce ou à l'eau salée ont pour but d'étudier dans quelle mesure il est possible de réduire les doses d'irrigation et quelle peut être, pour une contribution théorique du sol à l'alimentation hydrique fixée, la contribution réelle.

Les études faites dans 3 périmètres irrigués, répartis suivant un axe Nord-Sud de la Tunisie (Tunis, Sfax, Gabès) montrent une diminution de 10 p. 100 en moyenne de la consommation d'eau maximum dans le cas d'utilisation d'eaux chargées en sels.

Les possibilités d'utilisation des réserves d'eau du sol semblent montrer par ailleurs qu'il soit possible de réduire la dose d'irrigation de 25 p. 100 par rapport à celle qui est calculée pour assurer les besoins en eau maxima de la culture, c'est-à-dire son évapotranspiration potentielle.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) DAMAGNEZ. J. 1960. Le sol, l'eau et la plante : quelques problèmes de bioclimatologie . *Tunisie Agri* (mens.) **3**, p. 39-55.

(2) KRAMER P. J. 1956. Physical and physiological aspects of water absorption. *Handbuch der Pflanzenphysiology* 124-159, Springer-Verlag, Berlin.

(3) HALLAIRE M. Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour la végétation. *Ann. Agr.* (en cours de parution).

Ann. agron., 1961, **12** (1), 121-126.

631.671 : 631.415.3

PREMIERS RÉSULTATS DE L'ÉVOLUTION DE LA SALURE DU SOL PAR IRRIGATION A L'EAU SALÉE EN TUNISIE

J. P. COINTEPAS et P. ROEDERER

Service de Pédologie, Tunis

L'utilisation de l'eau salée pour l'irrigation étant un fait quasi général en Tunisie l'étude de l'influence de l'eau salée sur les sols et sur la production végétale revêt donc une importance particulière du point de vue scientifique et agronomique. Cette étude, dont nous donnons ici les premiers résultats, vient compléter l'étude bioclimatologique entreprise par le Centre de Bioclimatologie du Service Botanique et Agronomique de Tunisie (1). Son but est de déterminer :

— un bilan des sels dans le sol,

— le seuil de toxicité des principales plantes cultivées,

— le mode de lessivage des sels solubles accumulés dans la zone d'exploitation des racines.

MÉTHODE EXPÉRIMENTALE

Les études sur l'évolution du sol sous irrigation sont menées sur les mêmes essais que l'étude bioclimatologique de MM. DAMAGNEZ et DE VILLELE. Nous ne reviendrons donc pas ici sur la description des essais et nous renvoyons à l'étude publiée par ces auteurs dans le même numéro des Annales Agronomiques. Il nous suffit d'ajouter que tous les prélèvements effectues à la sonde pour la détermination des profils hydriques font l'objet d'une analyse des sels solubles. Les méthodes d'analyse sont celles que préconise le laboratoire de Riverside (2) aux États-Unis : préparation d'une pâte saturée de sol et dosage des éléments solubles Ca, Mg, Na, Cl, CO_3H et CO_3 sur sur un extrait de cette pâte. Par ailleurs on effectue sur ces mêmes échantillons le dosage du gypse et la granulométrie.

RÉSULTATS

I. — ESSAIS SUR MAIS ET COTON EN SOL GYPSEUX

Les premiers résultats disponibles portent sur la parcelle d'Aïn Zerig près de Gabès où on irrigue avec une eau à 2,88 g/l de résidu sec total dont 0,64 g/l de chlore. Le sol de la parcelle est un sol gypseux dont la teneur moyenne en gypse est de 20 p. 100 en surface mais diminue rapidement pour se limiter à 3 ou 5 p. 100 à partir de

(1) MM. J. DAMAGNEZ et O. DE VILLELE. Les besoins en eau réels des cultures et les possibilités d'utilisation des réserves d'eau du sol en Tunisie (Annales Agronomiques, même numéro).

(2) Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U. S Dept- of Agric. Hand book N° 60.

0,50 m. La nature du gypse varie également. Il est pulvérulent en surface où il tend à former un encroûtement. En profondeur au contraire il est surtout constitué par de gros cristaux et des roses des sables.

La salure du sol était très élevée au départ. Exprimé en conductivité de l'extrait saturé, cette salure variait de 3 à 5 mmhos/cm pour les 20 premiers cm, à 15 ou 20 mmhos/cm entre 20 cm et 1,50 m. puis retombait à 7 ou 8 mmhos/cm entre 1,50 et 2,00 m. (soit des teneurs en chlore respectivement de 0,020 — 0,250 et 0,07 p. 100 de terre sèche).

En 1960 les essais ont porté sur deux cultures : coton (variété longue fibre Pima 67) et maïs (Iowa 44-17). Ces deux cultures ont reçu au départ les doses d'irrigation suivantes :

— maïs : 350 mm. entre le 22/4/60 et le 16/6/60,
— coton : 550 mm. entre le 22/4/60 et le 1/7/60.

Par la suite on a apporté des quantités d'eau variables calculées à partir de l'évapotranspiration potentielle :

Traitement	Maïs	Coton
I (E. T. P.)	587 mm	694 mm
II	527 mm	—
III	467 mm	522 mm
IV	247 mm	354 mm

Les prélèvements de sol ont eu lieu avant l'application des traitements différentiels, en cours de végétation et après récolte.

Le dépouillement des résultats montre que la salure du sol avant et après expérience correspond au même équilibre ionique : chlore et sodium sont en quantités voisines, les ions SO_4 et CO_3H équilibrant sensiblement les ions Ca et Mg. Nous baserons donc notre étude des variations de salure du sol sur les variations de teneur en chlore. Il nous a paru intéressant également de distinguer deux couches de sol 0 à 1 m. et 1 à 2 m. dont les comportements semblent différents.

Les valeurs moyennes de la teneur en chlore sont rassemblées dans le tableau ci-joint.

On peut voir à l'examen de ce tableau que la teneur en chlore reste à peu près constante dans la couche 0 à 1 m. Elle présente une légère augmentation en cours de végétation dans les parcelles de coton. De ce fait la salure du sol après culture de coton est un peu supérieure à celle que l'on observe en fin de culture de maïs. Dans la couche 1-2 m. au contraire l'hétérogénéité du sol est très importante et masque l'ensemble des phénomènes de lessivage ou d'accumulation. Il semble qu'il y ait eu lessivage du sol en début de végétation puis accumulation de sel en fin de période végétative.

Ces résultats sont valables pour la zone exploitée par les racines mais ne tiennent pas compte des variations de salure dans la couche superficielle des billons. Quelques sondages effectués dans les parcelles de maïs ont montré que la concentration en sel dans les billons n'est pas de nature à modifier nos conclusions. La fréquence des irrigations (9 jours environ) est suffisante pour empêcher la formation d'une croûte de sel à la surface des billons.

Les autres éléments se sont comportés de façon variable.

Le calcium a peu varié puisqu'il provient de la solubilisation du gypse et que le milieu est saturé en gypse.

Salure du sol sous culture irriguée à Gabès

1) *maïs*

Traitement		Doses d'irrigation en mm		Salure du sol Chlore % de terre sèche		
		du 14/6 au 12/7	du 12/7 au 6/8	24/6/60	12/7/60	6/8/60
I	ETP	320	267	0,020* 0,119**	0,019 0,048	0,027 0,058
II	ETP — 3 mm/jour	290	237	0,019* 0,116**	0,029 0,085	0,027 0,083
III	ETP — 2 mm/jonr	260	207	0,025* 0,200**	0,016 0,048	0,026 0,082
IV	ETP — 4 mm/jour	200	147	0,016* 0,092**	0,035 0,055	0,024 0,166

2) *coton*

Traitement		Doses d'irrigation		Salure du sol		
		du 1/7 au 6/9	du 6/9 au 2/11	1/7/60	6/9/60	2/11/60
I	ETP	557	137	0,026* 0,197**	0,035 0,070	0,034 0,104
III	ETP — 3 mm/jour	426	96	0,020* 0,068**	0,038 0,045	0,038 0,101
IV	ETP — 4 mm/jour	297	57	0,017* 0,145**	0,031 0,051	0,035 0,045

* entre 0 et 1 m.
** entre 1 m. et 2 m.

Le magnésium est également peu mobile. Sa concentration reste constante dans les couches superficielles. Elle tend à diminuer en profondeur pour les doses d'irrigation les plus fortes et à augmenter lorsqu'on diminue les quantités d'eau. Le sodium soluble a varié de façon importante. Dans les parcelles de maïs on a pu noter une augmentation de la concentration en sodium dans les couches superficielles (0-50 cm.) et une diminution à partir 1 m. de profondeur sauf pour le traitement IV qui voit sa teneur en sodium soluble augmenter sur tout le profil.

II. — Essais sur maïs en sol limono-argileux

Le centre d'Étude de l'Eau à Tunis effectue plusieurs essais d'irrigation à l'eau salée. Un essai réalisé sur Maïs Iowa 44-17 suivant un protocole identique à l'essai de Gabès nous a donné une première série d'indications intéressantes.

Le sol est constitué par des alluvions fines (25 à 30 p. 100 d'argile, 40 p. 100 de limon) très riches en calcaire (40 p. 100) mais non salées. (conductivité moyenne de l'extrait saturée : 1.8 mmhos/cm. soit 0,015 p. 100 de chlore). L'eau d'irrigation

contient 2,68 g/l de sels totaux mais est plus chargée en chlore que celle de Gabès : 1,12 g/l au lieu de 0,64 g/l.

L'essai a été conduit de la manière suivante :

— du 21 Avril date du semis au 2 Juin on a apporté une dose uniforme de 300 mm. sur l'ensemble de l'essai.

— du 2 Juin au 8 Août le maïs à reçu 5 doses différentielles calculées à partir de l'évapotranspiration potentielle. Ces 5 doses sont les suivantes :

Traitement		Doses d'irrigation
A	E. T. P.	400 mm
B	E. T. P. — 1 mm jour	336 mm
C	E. T. P. — 2 mm jour	276 mm
D	E. T. P. — 4 mm jour	146 mm
E	E. T. P. — 6 mm jour	21 mm

Comme pour Aïn Zerig nous avons analysé les prélévements de sol du 2 Juin et du 18 Août date de la récolte et nous avons étudié les variations de salure entre 0 et 2 m. d'après les variations de la teneur en chlore. Nous avons obtenu les valeurs moyennes exprimées en p. 100 de terre sèche.

	A	B	C	D	E
2 Juin	0,017	0,015	0,013	0,015	0,016
18 Août	0,027	0,025	0,023	0,021	0,018

Il y a donc eu accumulation de sel et cette accumulation a été d'autant plus forte qu'on a irrigué avec plus d'eau. Pour le traitement E l'augmentation de salure n'est pas significative (1).

Autre résultat important : l'accumulation de sel se situe entre 0 et 1 m. de profondeur pour les traitements A et B, entre 0 et 0 m, 75 pour le traitement C, et entre 0 et 50 cm. pour les traitements D et E.

Profondeur moyenne du prélèvement	Augmentation de la salure entre le 2/6 et le 18/8/60		
	A	C	E
25 cm	0,015 %	0,020 %	0,015 %
50 «	0,028	0,034	0,006
75 «	0,018	0,013	0,001
100 «	0,009	0,001	0
125 «	0	0,002	0
150 «	0,004	0,002	0
175 «	0,001	0,001	0
200 «	0,002	0	0,002

CONCLUSION

Il n'est pas possible après une seule année d'expérimentation de tirer des conclusions définitives sur les problèmes de salure du sol par l'eau d'irrigation.

Nous pouvons cependant dès cette année poser quelques principes applicables à l'agronomie :

(1) Plus petite différence significative à P = 0,05 : 0,003 p. 100.

1. — En sol salé et gypseux (Aïn Zerig de Gabès)il est possible de réaliser un lessivage des sels permettant des rendements de maïs économiquement valables (59 qu/ha sur parcelles de 40 m²), alors que le maïs est considéré comme moyennement résistant au sel. Ce lessivage préalable est indispensable mais, résultat important, il a été obtenu avec des quantités d'eau d'irrigation relativement peu élevées : 350 mm. Par la suite il a été possible, en plein été, de réduire la dose d'irrigation de 20 p. 100 sans nuire au rendement de la culture.

Un tel résultat demande à être confirmé par une expérimentation portant sur plusieurs années. Il aurait cependant une conséquence pratique importante : on peut en effet envisager d'effectuer le lessivage des sels et la reconstitution des réserves en eau du sol en hiver à une époque où l'évaporation est moins intense et où on dispose d'un excédent d'eau. En été au contraire on pourrait réduire les doses d'irrigation suivant des proportions à fixer pour chaque culture. Une telle méthode permettrait une grosse économie d'eau et par conséquent un accroissement des surfaces irrigables.

2. — En sol non salé et irrigué à l'eau salée il faut éviter l'accumulation de sel. L'irrigation sera considérée comme un appoint devant être réduit au minimum compatible avec le rendement économique optimum.

Par contre il est préférable que le dessalement et la reconstitution des réserves en eau du sol se fasse grâce aux précipitations atmosphériques. Plus ces précipitations sont faibles, plus on doit réserver l'irrigation à des sols légers. Prenons l'exemple du Centre d'Étude de l'eau à Tunis où les sols sont lourds. Les réserves en eau utilisables par les plantes peuvent être estimées à 400 mm. dans la couche 0-2 m. La pluviométrie moyenne annuelle qui est de 400 mm. ne suffit pas à restituer ces réserves. Elle ne suffit donc pas à assurer le lessivage des sels solubles. Tandis qu'en sol plus léger la même pluviométrie suffirait à entrainer les sels en dehors de la zone des racines.

Au cas où il est cependant nécessaire d'assurer un lessivage des sels à l'aide de l'eau d'irrigation (sols trop argileux, pluviométrie déficitaire) cette opération sera réservée à la période hivernale où les ressources en eau sont plus importantes.

Les résultats de cette première année d'expérimentation nous ont indiqué dans quel sens doit être orientée l'expérimentation dans les années à venir. Nos hypothèses constituent en effet une révolution dans les méthodes d'irrigations de ce pays où on a pour habitude d'augmenter systématiquement les doses d'irrigation pour assurer le lessivage des sels solubles. On est donc arrivé à un gaspillage d'eau, d'une eau dont le prix de revient est extrêmement élevé par suite du coût des ouvrages de captage ou de sondage. La poursuite de notre expérimentation dira si on peut ou non réduire cette consommation excessive.

Reçu pour publication en novembre 1960.

RÉSUMÉ

La Section de Pédologie et le Centre de Bioclimatologie de Tunisie ont entrepris en 1960 une étude conjointe sur les besoins en eau des plantes en secteur irrigué à l'eau salée (2,7 à 2,9 g/1 de résidu sec). Appliquant des doses différctielles correspondant à l'évapotranspiration potentielle (E. T. P.) à l'E. T. P.— 1 mm/jour, E. T. P. — 2 mm/jour, E. T. P. — 4 mm/jour les auteurs ont constaté qu'en sol sablo-limoneux gypseux, salé les doses d'irrigation étaient suffisantes pour permettre des cultures de maïs et de coton. La doses d'eau la plus faible provoque une légère remontée de la salure.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 127-134.

631. 432 (44)

L'APPROVISIONNEMENT EN EAU DU SOL, LES FACTEURS CLIMATIQUES ET LA VÉGÉTATION DU MAIS DANS LE LANGUEDOC MÉDITERRANÉEN

M. GODARD,

Station de Bioclimatologie agricole, Centre de Recherches agronomiques du Midi, Montpellier.

Les essais eurent pour but l'étude du comportement du Maïs en fonction du mode d'alimentation en eau, en vue d'apporter ainsi une contribution à la technique des irrigations sous le climat du Languedoc méditerranéen. Les expériences furent effectuées à Montpellier en cases lysimétriques, de façon à préciser le bilan hydrique des cultures.

Tout d'abord, fin juin 1959 alors que les plantes n'atteignaient encore qu'une cinquantaine de centimètres de hauteur, les réserves d'eau furent reconstituées intégralement à l'aide d'une irrigation de complément qui nécessita 60 mm d'eau. Sur la profondeur des cases, la quantité d'eau disponible atteignit donc à cette époque sa valeur maximum.

Une série de cases fut ensuite conduite en culture fréquemment irriguée : placée ainsi dans des conditions voisines de l'évapotranspiration potentielle, elle servit de *témoin*. Une autre série fut conduite en *culture sèche* se développant seulement aux dépens des réserves d'eau du sol primitivement reconstituées et des pluies. Les observations culturales effectuées et les rendements à la récolte permirent de préciser la répercussion de cette modalité d'alimentation hydrique sur l'évolution de la culture.

DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les cases sont constituées par des cuves en maçonnerie de forme cubique de 2 m d'arête intérieure et présentent ainsi une surface cultivable de 4 m². L'épaisseur utile de terre, compte tenu du lit de drainage, atteint 1,65 à 1,70 m de profondeur. Le sol de remplissage est constitué par des alluvions argilo-calcaires perméables dont la capacité au champ est voisine de 25 p. 100 en moyenne sur l'ensemble du profil (humidité p. 100 de terre sèche) avec un point de flétrissement compris entre 11 et 12 p. 100. La réserve d'eau disponible au départ pour les plantes s'élevait ainsi à 320 mm environ.

Les huits cases, disposées de part et d'autre du couloir central de visite recouvert d'une dalle, sont séparées les unes des autres par une distance libre de 2,50 m. L'espace ainsi ménagé, de même que le terrain environnant, furent plantés également en maïs à une densité identique, L'ensemble du terrain cultivé de la sorte formait un rectangle de 25 m × 20 m. Une telle parcelle ne peut évidement faire obstacle complètement aux effets d'oasis dus aux phénomènes d'advection de l'air et de la vapeur d'eau. Cependant, la ceinture végétale environnante ainsi constituée déterminait pour les cases d'expérience le même climat solaire qu'en grande culture et ménageait en

outre à ces cultures expérimentales le même effet d'interception vis-à-vis de la pluie qu'en plein champ.

La variété utilisée IOWA 4417 fut semée le 15 mai 1959 en sol fortement fumé à raison de 4 plantes au m², plantation en carré à 50 cm × 50 cm, soit à une densité de 40 000 pieds à l'hectare. Cette densité, bien qu'un peu inférieure à celle correspondant à la productivité maximum de la variété fut néanmoins adoptée pour des raisons de commodité de mise en place des plants, liées aux dimensions des cases. Le couvert du sol par la végétation fut atteint aux environs du 10 juillet. La maturité des épis fut notée dans la première décade de septembre.

On étudiera principalement ici la période des mois de juillet et d'août qui furent déterminants sur le comportement et le rendement des plantes.

DÉTERMINATION DE L'EAU CONSOMMÉE PAR LES CULTURES

A la fin juin 1959, rappelons-le, les réserves d'eau du sol avaient été intégralement reconstituées sur l'ensemble des cases. Lors de l'irrigation suivante des cases témoin, la dose d'eau d'arrosage, soit I mm, par exemple exprimée en hauteur d'eau, fut chaque fois apportée en excès de façon à humecter le sol complètement et provoquer un drainage au fond des cases. Celui-ci, très rapide en raison de la bonne perméabilité du sol, était mesuré : soit D mm. La différence connue I mm — D mm représentait donc la quantité d'eau retenue par le sol, nécessaire pour le resaturer jusqu'à sa capacité de rétention au champ. Elle correspond ainsi au déficit hydrique du sol. La valeur de ce déficit additionnée aux pluies tombées pendant la période séparant les deux irrigations représente évidemment la consommation de la culture pendant l'intervalle de temps considéré. En procédant chaque fois ainsi lors des irrigations successives, il a été possible de suivre l'évapotranspiration de la culture-témoin irriguée. A partir du 10 juillet où le couvert végétal fut réalisé, celle-ci correspond sensiblement à l'évapotranspiration potentielle.

Pour la culture sèche, une irrigation réhumectant complètement le sol mais donnée seulement en septembre a permis, suivant la même méthode, de connaître la consommation totale d'eau pour l'ensemble de la période de végétation considérée.

LES CONDITIONS CLIMATIQUES EN JUILLET ET AOUT 1959

Le mois de juillet, normalement ensoleillé dans son ensemble, fut toutefois caractérisé par des températures fortement excédentaires qui déterminèrent un déficit de saturation atmosphérique élevé. Il en résulta des conditions sévères d'évapotranspiration potentielle avec des maxima particulièrement accusés du 15 au 23 juillet. Le mois d'août, avec des températures voisines de la normale et une hygrométrie plus élevée, fut moins favorable à une forte transpiration notamment au cours de la dernière décade, de tendance orageuse. Le tableau 1 indique certaines données climatiques permettant de situer l'ambiance atmosphérique au cours de périodes particulièrement typiques. Pour la période s'étendant de fin juin au 14 juillet, au début de laquelle les plantes étaient encore peu développées et pour septembre en fin de végétation, les valeurs de l'évapotranspiration potentielle sont indiquées à partir de différents résultats expérimentaux observés à la Station.

Au cours des deux mois de juillet et d'août, trois pluies notables seulement furent observées : sur un total de 121 mm de précipitations, 29 mm tombèrent le 24 juillet

et 27 mm le 10 août. Le 21 août enfin, au cours d'une journée de pluie continue on recueillit 56 mm d'eau. La première décade de septembre fut ensuite pluvieuse, mais les plantes approchaient alors de leur maturité.

TABLEAU I

Montpellier 1959. — Données climatiques au cours de la période de végétation du Maïs.

	28/6-14/7	15/7-23/7	24/7-6/8	7/8-20/8	21/8-31/8	1er-10/9
Température maximum de l'air °*C*...............	30°4	33°1	30°0	28°0	26°8	22°4
Fraction d'insolation :						
1959	0,71	0,72	0,78	0,67	0,54	0,43
Normale	0,72	0,74	0,77	0,73	0,68	0,65
Précipitations *total en mm*.	2,5	0	29,2	30,8	58,8	30,6
Évapotranspiration potentielle *mm par jour*..............	8,4	11,7	8,8	7,0	4,9	3,1

CULTURE SÈCHE ET ÉPUISEMENT DES RÉSERVES D'EAU DU SOL

Pendant la période du 28 juin au 31 août, la consommation d'eau par la culture irriguée s'éleva à 490 mm, correspondant à une évapotranspiration moyenne de 7,4 mm par jour.

Pour la culture sèche la consommation d'eau a atteint 358 mm seulement pendant la même période, soit 5,4 mm par jour. Sur cette quantité, 121 mm furent apportés par les pluies. Le complément, soit 237 mm, est donc provenu des réserves d'eau initiales du sol. La contribution de ce dernier s'élève ainsi à 66 p. 100 de l'eau consommée par les plantes, proportion considérable.

L'assèchement du sol qui en est résulté a été suivi par des dosages effectués à différentes époques. Tout en précisant les profils d'humidité du sol en place, on a pu ainsi déterminer la valeur du déficit hydrique correspondant. L'évapo-transpiration de la culture a été calculée en ajoutant les pluies aux variations de ce déficit.

Le tableau II présente pour des époques caractéristiques, diverses valeurs du déficit ainsi observé (col. 3).

Le 28 juin, après la réhumectation générale du sol, le déficit hydrique est nul. Mais le temps restant sec au cours des trois premières semaines de juillet, l'alimentation des plantes s'effectue uniquement à partir des réserves d'eau du sol. Aussi le déficit s'accroît et cela d'autant plus vite que c'est la période de développement rapide des plantes. Le 11 juillet, il est déjà compris entre 90 et 100 mm.

La floraison femelle se produit vers le 20 juillet pour les différentes cultures. Cette phase coïncide avec des valeurs très élevées de l'évapotranspiration potentielle : celle-ci dépasse 10 mm par jour pendant la période du 15 au 23 juillet. Ces conditions atmosphériques sont rendues d'autant plus sévères pour la plante que l'assèchement du sol devient déjà très prononcé : le 23 juillet, le point de flétrissement est atteint jusqu'à 55 cm de profondeur. Ce jour même et le lendemain au milieu de la journée, des symptômes de fanaison sont observés au sommet des plantes. Mais ils furent passagers car dès le soir du 24, à la suite d'un orage la température

TABLEAU II

Montpellier 1959. — Assèchement du sol et évapotranspiration de la culture sèche au cours de périodes caractéristiques.

Périodes	Nombre de jours	Culture irriguée		Culture sèche					Rapport des évapotranspirations
		Évapotranspiration (mm)		Déficit du sol (mm)	Variation du déficit	Pluie (mm)	Évapotranspiration (mm)		
		Totale (1)	Par jour (2)	(3)	(4)	(5)	Totale (6)	Par jour (7)	(8)
28/6 au 27/7	31	247	8,0	164	164	31	195	6,3	0,79
28/7 au 20/8	24	191	7,9	259	95	31	126	5,2	0,66
21/8	1			203	— 56	56			
22/8 au 31/8	10	52	5,2	237	34	3	37	3,7	0,71
Du 28/6........ au 31/8	66	490	7,4			121	358	5,4	0,75

s'abaissa et les conditions d'évapotranspiration perdirent leur caractère excessif. Le 27 juillet le déficit hydrique du sol atteint cependant 164 mm.

A partir donc des derniers jours de juillet et plus particulièrement à compter du 7 août, les conditions climatiques devinrent plus normales, permettant ainsi à la végétation de garder un aspect satisfaisant. Cependant, aucune pluie vraiment abondante ne se produisant, le déficit du sol continue à s'accroître. Déjà le 12 août, le sol atteint le point de flétrissement à 70-80 cm de profondeur. Enfin, le 20 août, le déficit s'élève à 260 mm sans que cependant les plantes aient montré de nouveaux signes dépressifs visibles.

Ainsi, au cours des deux semaines précédant le 20 août, pendant lesquelles les conditions physiques externes correspondirent à une évapotranspiration potentielle de l'ordre de 7 mm par jour en moyenne, la plante a montré qu'elle pouvait s'alimenter à un niveau particulièrement profond du sol sans dommages apparents à sa végétation.

Pour l'ensemble de la période de fin juin au 20 août, soit en 55 jours, les éléments du tableau II montrent que le sol a pu fournir à la culture sèche 4,7 mm d'eau par jour provenant des réserves initiales.

Une pluie presque continue tombée pendant toute la journée du 21 août va ramener le déficit du sol aux environs de 200 mm. En outre désormais les conditions atmosphériques ont nettement changé et le temps devient plus frais. Aussi, l'épuisement du sol se poursuit à une vitesse beaucoup moins grande. Le 31 août, le déficit atteint 237 mm, toujours sans que les plantes aient manifesté de flétrissement.

Enfin, au cours de la première décade de septembre, de température nettement déficitaire, on assiste à une réduction progressive de la surface transpiratoire ; les plantes tendent à se dessécher et arrivent à maturité.

LA CONSOMMATION D'EAU PAR LA CULTURE SÈCHE

Pour chaque période, l'eau consommée a été déterminée, compte tenu des pluies tombées et de l'assèchement du sol traduit par la variation du déficit hydrique (tabl. II, col. 4) pendant la période considérée.

Le tableau II montre que l'évapotranspiration des cases en culture sèche a toujours été inférieure à l'évapotranspiration potentielle. Cependant, la consommation de la culture sèche s'est progressivement réduite par rapport à l'évapotranspiration des cases irriguées. Le rapport des consommations atteint encore près de 0,80 pendant le premier mois. Mais il diminue ensuite au fur et à mesure que s'accroît le déficit hydrique du sol et il atteint sa valeur minimum aux environs du 20 août. A cette époque l'eau utilisable existant encore dans le sol ne s'élevait plus qu'à 20 p. 100 de celle qui existait fin juin sur toute la profondeur des cases.

Le caractère progressif de cette réduction de l'eau consommée par la culture sèche par rapport à la culture pleinement irriguée est évidemment lié à une diminution de la transpiration des plantes elles-mêmes au fur et à mesure que l'eau disponible se trouve à un niveau plus profond. Mais d'autre part, la réduction générale de l'eau consommée doit aussi être causée en partie par une forte diminution des processus physiques de l'évaporation au niveau du sol lui-même des cases non irriguées. En effet, la surface de ce dernier se maintenant sèche, forme un écran protecteur pour les couches sous-jacentes. En culture irriguée au contraire, la surface est fréquemment humi-

difiée par la dose d'eau apportée et dont la totalité est nécessairement prise en compte pour l'établissement du bilan hydrique de la culture. Dans les petites parcelles expérimentales utilisées ici, ces apports d'eau sont donc davantage exposés aux phénomènes d'évaporation physique liés aux processus d'advection. Ainsi est augmentée davantage la consommation des cases irriguées et par voie de conséquence le contraste relatif entre les quantités d'eau consommées par la culture sèche et la culture irriguée.

RENDEMENTS OBSERVÉS A LA RÉCOLTE

D'une manière générale, la diminution de la transpiration des plantes observée en culture sèche a correspondu à une diminution de l'assimilation. En effet, à la récolte (tab. III), on observe une réduction de la *substance sèche totale* élaborée par la culture sèche qui atteint 9 p. 100 par rapport à la culture normalement irriguée, la production de cette dernière s'élevant à 182 quintaux de matière sèche à l'hectare. Cependant, cet écart apparaît relativement faible, eu égard aux conditions d'alimentation hydrique profonde supportées par les plantes. Corrélativement, rappelons que les symptômes dépressifs observés au cours de la végétation furent discrets.

TABLEAU III

Rendements à la récolte exprimés en quintaux à l'hectare.

	Témoin irrigué	Culture sèche
Plante entière		
Substance sèche	182,0	166,0
Indice	*100*	*91*
Grains		
Substance sèche	94,1	82,7
Indice	*100*	*88*
Récolte (commercialisée à 15 % d'humidité)	111	97

La *récolte de grains* produite par la culture irriguée s'élève à 94 quintaux de substance sèche à l'hectare, soit 111 quintaux en récolte commercialisée, fort rendement, compte tenu de la densité de plantation de la variété.

Le rendement en grains de la culture sèche subit une diminution relative de 12 p. 100, plus sensible que pour la matière sèche totale élaborée. La récolte obtenue qui atteint donc 88 p. 100 de celle du témoin, correspond toutefois à un rendement commercial encore très satisfaisant de 97 quintaux à l'hectare.

Cette réduction des rendements de la culture sèche, davantage marquée pour la récolte de grains, doit plus particulièrement être attribuée à l'influence des symptômes dépressifs traduits par le flétrissement qui affecta les plantes à l'époque de la floraison. C'est ce qui ressort de l'étude des éléments du rendement présentés par le tableau IV, d'après les dépouillements effectués à la récolte.

En effet, pour la culture sèche, le *nombre des grains* par plante est plus faible, s'élevant à 610 seulement au lieu de 734 pour le témoin irrigué. Cette réduction qui

atteint 17 p. 100 en valeur relative est donc nettement plus forte que celle ayant affecté le poids total des grains récoltés par plante et qui, on l'a vu, s'élève à 12 p. 100 seulement. Ce fait traduit donc directement l'influence dépressive sur le nombre de grains noués de toute insuffisance d'eau à l'époque critique de la floraison.

TABLEAU IV

Nombre de grains par pied, poids individuel d'un grain et rendement d'une plante.

	Nombre de grains par plante	Poids d'un grain en g.	Rendement d'une plante en g.
Témoin irrigué			
Valeur absolue	734	0,322	236
Indice	*100*	*100*	*100*
Culture sèche			
Valeur absolue	610	0,340	208
Indice	*83*	*106*	*88*

Toutefois, dans les conditions de l'expérience l'influence dépressive ayant été seulement passagère, les substances assimilées par la suite au cours de la phase de maturation par les plantes de la culture sèche ont alors migré dans un nombre de grains moins élevés. Ces derniers ont été mieux nourris et présentent donc un poids individuel plus élevé que pour le témoin pleinement irrigué : C'est bien ce que traduit la colonne 2 du tableau IV indiquant le poids d'un grain pour les deux cultures.

Ainsi de façon inattendue, en culture sèche les grains ont été moins nombreux mais plus gros qu'en culture irriguée. Cependant, cette augmentation de poids individuel n'a pu évidemment être suffisante pour compenser la réduction du nombre de grains, en raison notamment de la moins bonne assimilation générale de la plante, liée à l'alimentation en eau moins favorable. En définitive, le rendement de la culture sèche est donc resté plus faible.

CONCLUSIONS

Pour le sol d'alluvions considéré, épais et de bonnes propriétés hydrodynamiques, les résultats observés soulignent l'aptitude du Maïs à s'alimenter dans les couches profondes du sol dont la contribution a pu atteindre 4 à 5 mm par jour et à s'adapter ainsi à un déficit hydrique du sol marqué. Au mois d'août pendant la phase de maturation, les plantes ont pu supporter sans dépression particulièrement grave de l'assimilation générale, des périodes où les conditions climatiques correspondirent à une évapotranspiration potentielle de 7 à 8 mm par jour, tout en s'approvisionnant presque constamment au-dessous de 60 à 70 cm de profondeur.

Au contraire, il aurait importé essentiellement d'assurer l'alimentation en eau maximum quand les plantes atteignirent l'âge adulte. En effet, au début de la floraison femelle vers le 20 juillet, des conditions édaphiques un peu moins sévères jointes, il est vrai, à des conditions atmosphériques particulièrement excessives ont déterminé une réduction du nombre de grains récoltés, facteur important du rendement.

Dans la pratique des irrigations, ces deux séries de faits soulignent tout d'abord que l'on doit rechercher un réapprovisionnement rapide du sol, susceptible d'assurer aux cultures la satisfaction de leurs besoins afin d'obtenir les rendements maximums.

En outre, ils montrent cependant qu'en cas d'insuffisance d'eau d'arrosage, il vaudra mieux pour le planteur de maïs choisir de différer l'irrigation de certaines cultures plus âgées, compte tenu évidemment des conditions momentanées du milieu physique. L'eau rendue ainsi disponible sera consacrée de préférence avec plus d'efficacité à l'alimentation maximum des plantes près d'atteindre la phase de floraison.

A cet égard, en raison de la sécheresse estivale propre au climat méditerranéen, les résultats obtenus montrent qu'en sol profond, une irrigation initiale donnée à une date précoce et réhumectant complètement le sol permet de constituer avec profit un stock de sécurité dans le sol. Ceci doit être rendu relativement aisé à une époque où la demande d'eau par les utilisateurs n'est pas encore très grande et peut même contribuer en outre à faciliter l'exploitation d'un réseau d'irrigation en étalant ainsi les demandes des usagers. Tout en assurant à la culture une réserve précieuse, cette pratique peut conduire à une économie de main-d'œuvre par la réduction du nombre des arrosages auquel elle conduit. Enfin, tout au moins pour un champ de dimensions restreintes, cette technique doit permettre une économie d'eau d'irrigation dont une grande partie se trouve ainsi soustraite dès le début aux processus de l'évaporation physique affectant plus spécialement les couches superficielles du sol lui-même.

Reçu pour publication en novembre 1960.

RÉSUMÉ

Les essais ont porté sur maïs, cultivé en cases lysimétriques de 2 m de profondeur, en sol d'alluvions. Le sol fut complètement resaturé sur toute son épaisseur par une irrigation à fin juin, trois semaines avant la floraison femelle alors que les plantes atteignaient 50 cm de haut. Sur une série de cases, aucune irrigation ultérieure ne fut ensuite donnée : l'alimentation hydrique s'effectua donc aux seuls dépens du stock ainsi accumulé et des pluies tombées. Cette série sera dénommée ici « culture sèche ». Une autre série de cases fut irriguée suivant l'évapotranspiration potentielle et servit de témoin.

Pendant la période de juillet et d'août, la culture sèche a consommé 360 mm d'eau environ. Sur ce total, plus des *deux tiers* ont été fournis par les réserves accumulées dans le sol. L'assèchement progressif du sol qui en est résulté s'est traduit par un déficit hydrique important ayant atteint un maximum de 260 mm et la plante a été contrainte de s'alimenter dans des couches du sol de plus en plus profondes. Cependant, elle n'a pas manifesté de symptômes dépressifs visibles, sauf un léger flétrissement des sommets pendant la floraison femelle, tout à fait à la fin d'une série de journées particulièrement sévères. Ces symptômes entraînèrent une nette réduction du nombre de grains récoltés par plante.

La consommation en eau et les rendements de la culture témoin ont été les plus élevés, ce qui souligne la nécessité d'apports d'eau réguliers pour le maximum de production. Cependant le rendement en grains de la culture sèche a été inférieur de 12 p. 100 seulement par rapport au témoin.

Ces résultats soulignent l'aptitude de la plante à s'alimenter dans les couches profondes du sol. En raison de la sécheresse de l'été méditerranéen, il peut donc être profitable de réhumecter complètement le sol à une date relativement précoce afin de constituer un stock de sécurité. La demande d'eau par les utilisateurs n'est alors pas encore très grande et l'exploitation d'un réseau d'irrigation peut en être en outre facilitée. Ultérieurement, l'eau disponible sera consacrée de préférence, avec le maximum d'efficacité, aux plantes près d'atteindre la floraison.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 135-144.

631. 67 (44)

COMPTE RENDU DES ESSAIS D'IRRIGATION FAITS A L'ÉCOLE DE VALABRE EN 1959 ET 1960

J. GRANIER A
École d'Agriculture, Valabre.

La création, à partir de 1957, dans la région d'Aix-en-Provence, de réseaux d'irrigation en canalisations enterrées et répondant aux trois conditions suivantes

— distribution à la demande (sans tour de rôle) ;

— distribution sous pression (permettant l'aspersion) ;

— paiement au volume consommé (avec un tarif progressif) a donné une importance pratique très grande aux essais d'irrigation.

En effet sur ces réseaux et contrairement à ce qui se passe dans les périmètres desservis par les canaux, on peut :

— faire varier librement la fréquence et la dose ;

— donner des doses sensiblement identiques sur tous les points d'un champ grâce à une pluviométrie homogène.

L'eau étant ainsi considérée pour la première fois comme une matière première semblable aux engrais, il devient très utile de connaître la relation entre le rendement des cultures et l'eau (apportée ou consommée) afin de déterminer en dernière analyse les arrosages qui assurent le rendement économique optimum.

Cependant, à la différence des engrais, des pluies naturelles imprévisibles s'ajoutent aux pluies artificielles et peuvent soit rendre inutiles les arrosages, soit entraîner par leur excès des effets dépressifs. De toutes façons, il convient d'en tenir compte pour interpréter les résultats des essais en cultures.

Sur les indications de la section centrale de l'hydraulique agricole et à la demande de la Société d'aménagement de la région provençale et du canal de Provence l'École d'Agriculture de Valabre a réalisé en 1959 et 1960 des essais en cultures ayant pour but de :

— délimiter le problème des doses et fréquences optima dans les conditions de la pratique régionale ;

— vérifier la valeur pratique des fomules d'évapotranspiration de BLANEY et CRIDDLE qui sont jusqu'à présent utilisées pour le calcul des réseaux d'irrigation.

Le nombre élevé des observations et des mesures réalisées a permis de se faire une idée plus exacte de la pratique des arrosages et d'en modifier la technique traditionnelle.

I. — PRINCIPE ET RÉALISATION DES ESSAIS

A. — *Principe des essais.*

Cultures.

Les essais ont porté sur des cultures dont le développement maximum n'est jamais possible sous nos climats sans arrosages :

1° Fourrages (luzerne).

2° Légumes frais (artichauts).

3° Pommes de terre (demi-primeurs).

Traitements.

Les différents traitements mis en comparaison consistent *à maintenir l'humidité du sol à une certaine profondeur entre deux limites fixées à l'avance (plancher et plafond)* par exemple 70 p. 100 et 100 p. 100 de l' « humidité équivalente ». La formule adoptée à l'avantage de se référer à un état du sol qui est un repère relativement pratique. Les traitements adoptés à priori sur les différents essais figurent au tableau 1.

TABLEAU I

Plafond et plancher des humidités en pourcentage de l'humidité équivalente

Traitements	A	B	C	D	E	Profondeur humectée
Luzerne 1959	70-100	50-70	au sec			1 m
Luzerne 1960	70-100	50-70	au sec			1 m 20
Pommes de terre	90-110	75-95	60-80			0 m 80
Artichauts	90-110	80-100	70-90 puis 90-110	80-110	70-110	0 m 80

Dans les essais sur artichauts nous avons fait varier non seulement l'emplacement mais également la valeur de la « fourchette plancher-plafond » (20-30-40 p. 100 de l'humidité équivalente). Les traitements A-B-C conduisent donc à des doses en principe égales mais données à des dates distinctes, les traitements D-E à des doses 1,5 et 2 fois plus fortes que les précédentes. Enfin, pour suivre l'usage local, le traitement C a été mené d'abord (jusqu'à la fructification) à « humidité faible » 70-90 p.100 et ensuite (pendant la fructification) à « humidité forte » 90-110 p. 100.

Détermination des arrosages. Dates et doses.

La date est déterminée par le moment où l'humidité atteint le plancher à une profondeur donnée (par exemple 25 cm).

La dose correspondante est calculée chaque fois pour ramener l'humidité à la valeur plafond à partir de l'humidité actuelle et sur une profondeur humectée fixée à l'avance (tableau 1).

B. — *Réalisation des essais.*

Dispositif.

Un dispositif uniforme a été adopté pour la réalisation des essais. Les parcelles de 12 m × 36 m sont desservies par 6 asperseurs demi-rotatifs placés à 12 m. Le comptage est assuré par la borne qui alimente le champ.

Les parcelles sont répétées 4 fois par traitement et réparties par blocs (au total 4 blocs contenant autant de parcelles que de traitements).

Humidité.

L'humidité équivalente est déterminée par une étude pédologique préalable du champ. Les capacités de rétention sont mesurées à la centrifugeuse.

Les humidités actuelles sont mesurées par dessication à l'étuve à 105° et ramenées à la terre fine. Les échantillons sont prélevés à la tarière sur la ligne médiane des parcelles à intervalles réguliers (en principe tous les deux jours).

Divers.

L'arrosage est déclenché, sauf empêchement, dans les 24 heures qui suivent la mesure de l'humidité. Dans des conditions particulières (grosse chaleur, vent excessif) on ajuste la dose d'après de nouveaux prélèvements de terre.

Les récoltes sont faites par prélèvements au milieu de la parcelle en éliminant les bordures où l'arrosage est moins régulier.

L'application des traitements a amené à pratiquer des arrosages très différents en nombre et en doses sur les différents essais (cf. tableau II).

TABLEAU 2

Arrosages pratiques

N : nombre D_t : doses totales D_m : doses moyennes P : pluies

Traitements	A			B			C			D			E			P
	N	D_t	D_m	N	D_t	D_m	N	D_t	D_m	N	D_t	D_m	N	D_t	D_m	
Luzerne 1959 (¹)......	11	537	49	9	298	33	0	0	0							82
Luzerne 1960	5	320	64	4	145	38	0	0	0							280,5
Pommes de terre 1960.	9	346	38	6	191	32	3	68	22							146
Artichauts 1960 (²) ...	8	397	50	5	260	52	5	311	62	4	305	76	2	177	88	342,3

(¹) Non compris un arrosage commun d'homogénisation de 45 mm en début de saison.
(²) Non compris les arrosages de repiquage (9 arrosages du 1er au 20 mai), soit 190 mm qui assurent une saturation permanente pendant cette période.

Remarque importante, les traitements quels qu'ils soient, conduisent à des arrosages moins nombreux et moins copieux que ceux reçus par les cultures traditionnelles voisines et sont loin d'utiliser le volume considéré comme normal de 10 000 m^3/ha soit 1 000 mm de pluie.

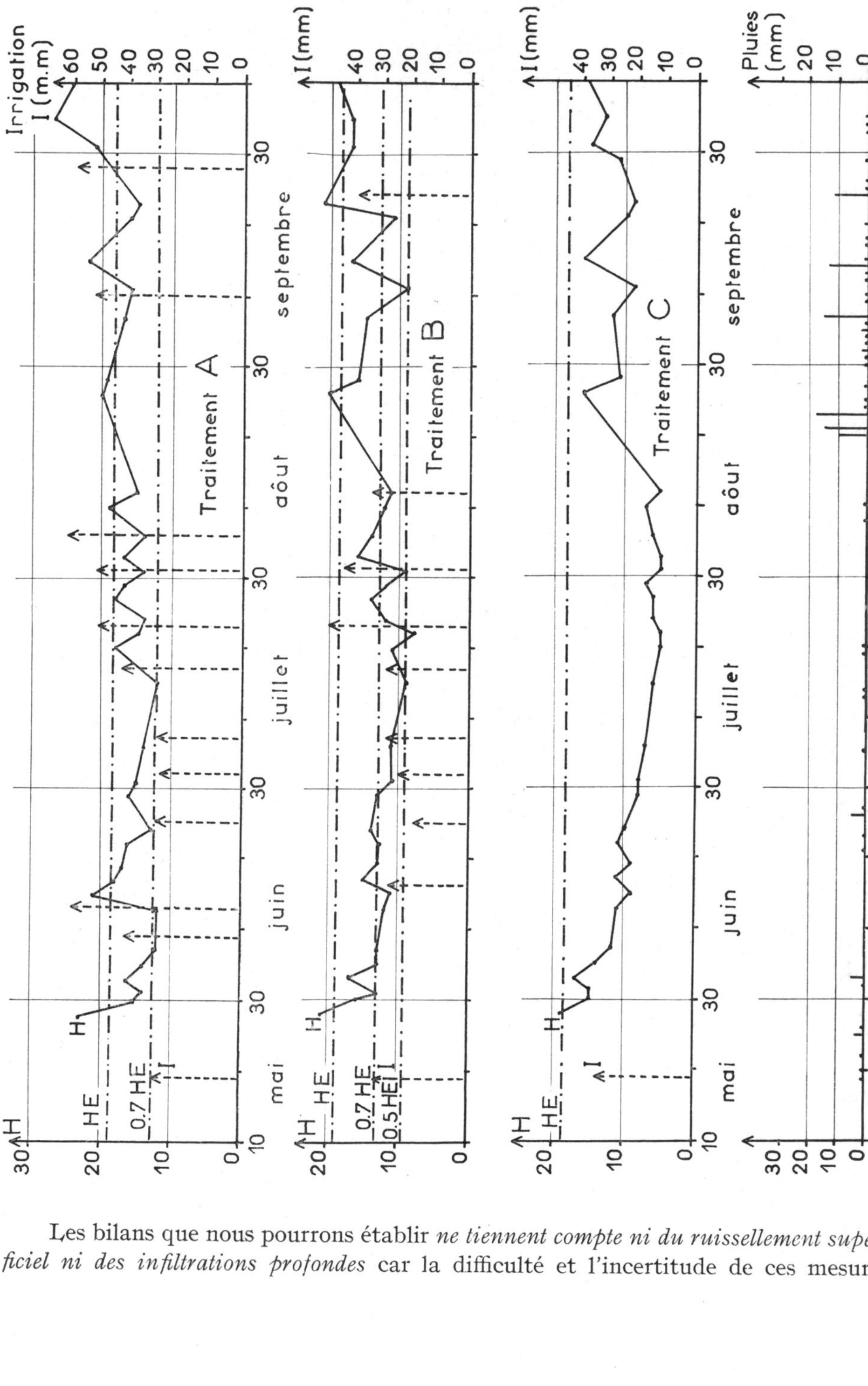
II. — RÉSULTATS

Remarque préliminaire.

Les résultats essentiels portent sur les rendements obtenus en fonction des traitements mais il est également intéressant de suivre l'évolution de l'eau dans le sol en utilisant l'ensemble des mesures effectuées pour déterminer les arrosages. Nous avons ainsi à notre disposition :

— les mesures d'humidité du sol (à l'étuve à 105°) ;

— les mesures de pluies naturelles (au pluviomètre) ;
— les mesures de pluies artificielles (au compteur).



Graphique I. — Humidité du sol à 25 cm. Luzerne 1959.

Les bilans que nous pourrons établir *ne tiennent compte ni du ruissellement superficiel ni des infiltrations profondes* car la difficulté et l'incertitude de ces mesures

nous ont obligé à y renoncer. Chaque fois que ces phénomènes seront intervenus, à la suite de pluies excessives *la consommation réelle des cultures aura été inférieure à celle calculée sur les bilans*. C'est d'ailleurs le cas des irrigations à la raie où une fraction souvent importante des eaux distribuées est ainsi perdue.

Par contre des sondages effectués juste avant et après nos arrosages nous ont convaincus que les pluies artificielles distribuées étaient retenues dans la zone envisagée pour les essais (1,20 m ou 0,80 m selon les cas) sans infiltrations plus profondes.

A. — *Humidité du sol.*

Nous donnons à titre d'exemple le graphique des humidités en fonction du temps à une profondeur de 25 cm, relevées sur l'essai luzerne en 1959 (fig. I).

On voit que nous avons réussi à maintenir correctement les valeurs entre les limites fixées, *de début juin à fin août*. Au delà, les pluies naturelles, ont relevé les humidités très au-dessus du plafond. Dans les parcelles C (au sec) la courbe descend asymptotiquement vers 20 p. 100 de l'humidité équivalente H. E. La croissance de la luzerne s'est totalement arrêtée après le 9/7 (humidité de 35 p. 100) pour ne reprendre que vers le 25 août (humidité 80 p. 100). A la date du 9/7 l'humidité en profondeur à 1 m était encore de 45 p. 100 de l'H. E. L'enracinement probablement très profond de la luzerne nous empêche de voir un rapport quelconque entre le point de flétrissement et ces valeurs relevées à 25 cm de profondeur.

TABLEAU 3

Tableau comparatif des évapotranspirations calculées et mesurées en mm/jour.

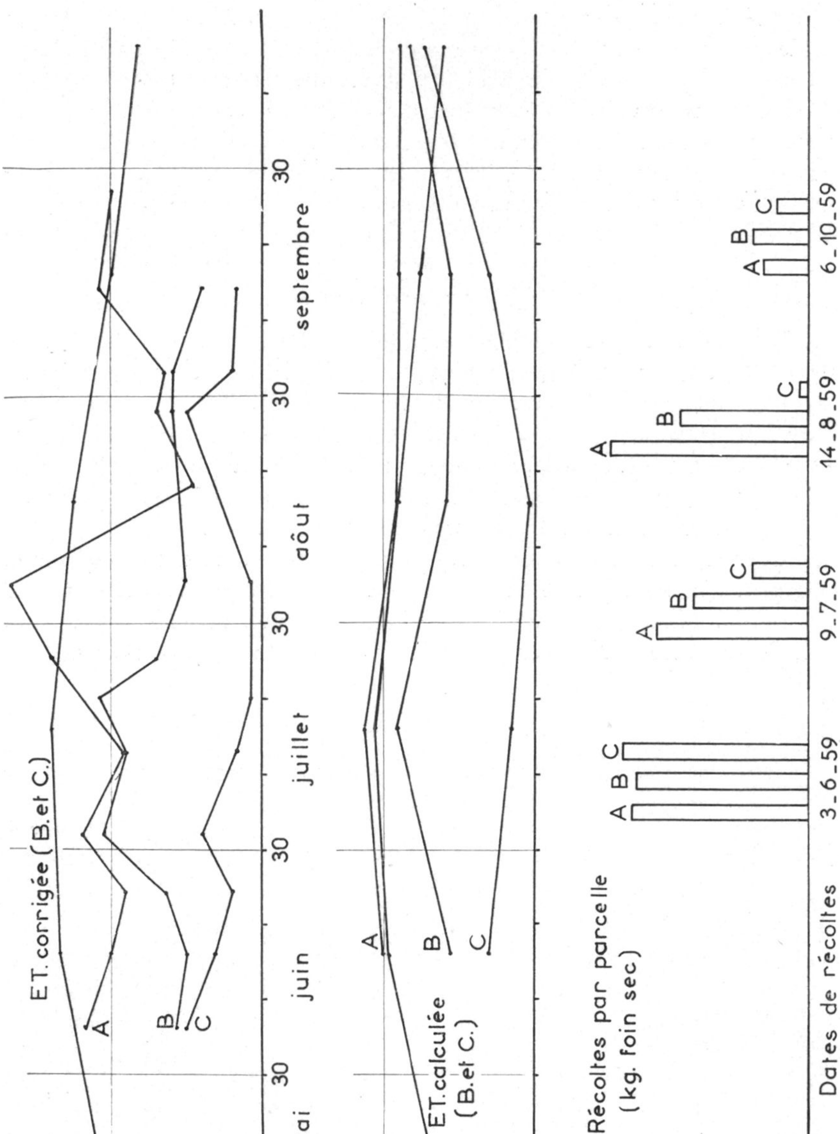
Colonne 1 : Mensuelle. Colonne 2 : Décadaire la plus forte du mois.

		Avril		Mai		Juin		Juillet		Août		Sept.		Octobre	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Luzerne 1959	E. T. mesurée					5	*5,8*	5,7	*7,0*	*4,6*	8,4	5	5	4,5	4,5
	E. T. calculée (B. C.)					4,9	6,8	5,2	7	4,6	6,3	3,7	5	3	4,1
Luzerne 1960	E. T. mesurée	*2,7*	*3,4*	*3,7*	*4,8*	*4,7*	9,3	*4*	6,8	5,2	5,9				
	E. T. calculée (B. C.)	3,06	4,2	4,2	5,8	4,7	6,6	4,8	6,5	3,8	5,2				
Légumes 1960	Pommes de Terre E. T. mesurée	*2,3*	6,5	8,3	10,6	7,2	8,5								
	Artichauts E. T. mesurée					5,9	8,7	6,1	7,6	5,8	8,7	5,9	7,7		
	E. T. calculée (B. C.)	2,5	4	3,4	5,6	3,9	6,3	3,8	6,06	3,1	5	2,7	4,3		

E. T. = Évapotranspiration.
B. C. = BLANEY-CRIDDLE.

Les Évapotranspirations mesurées inférieures ou égales aux Évapotranspirations calculées sont en *italique*.

Les Évapotranspirations indiquées sur ce tableau sont celles mesurées dans chaque essai pour le traitement A qui reçoit les plus fortes doses, c'est donc l'Évapotranspiration maxima qui est ici comparée à l'Évapotranspiration potentielle calculée par la méthode BLANEY-CRIDDLE.



Graphique II. — Évapotranspiration. Luzerne 1959.

B. — *Évapotranspiration (moyennes décadaires et mensuelles). E. T.*

Les évapotranspirations sont exprimées en mm/jour *par décades* et *par mois*. Le tableau 3 permet de comparer les évapotranspirations mesurées avec les valeurs de l'évapotranspiration potentielle calculées suivant les formules de BLANEY et CRIDDLE. Le graphique concerne seulement l'essai luzerne 1959.

En ce qui concerne la luzerne, les valeurs maximales de l'E. T. (traitement A) sont généralement inférieures à celles admises par la formule de BLANEY-CRIDDLE.

Les valeurs de l'E. T. de 1960 sont plus faibles que celles de 1959 ce qui paraît dû à un climat moins chaud et moins ensoleillé, mais les observations concernant la durée d'insolation nous manquent.

Par contre les valeurs de l'E. T. mesurées pour les artichauts et les pommes de terre en 1960 (traitements A) atteignent presque le double des valeurs moyennes admises par BLANEY et CRIDDLE pour les légumes. Elles demandent sans doute à être révisées en tenant compte de la nature exacte des cultures légumières dont l'évapotranspiration, suivant l'espèce, est différente.

C. — *Bilan de la consommation d'eau.*

Pour chaque essai nous avons établi un bilan de la consommation d'eau. Pour la luzerne le bilan est établi récolte par récolte.

Les essais sont calculés d'après les humidités des prélèvements.

Les quantités consommées restent faibles (5 000 à 7 500 m^3 pour les traitements les plus « humides »). Malgré l'incertitude inévitable de ces mesures, l'ordre de grandeur est vraisemblable. On doit noter la très faible importance des quantités d'eau prélevées dans le sol, souvent moins de 10 p. 100 de la consommation totale (sauf en ce qui concerne les luzernes au sec). Les artichauts, en particulier, semblent vivre entièrement sur les apports d'eau (naturels et artificiels).

D. — *Rendements en fonction des consommations d'eau.*

Nous appellerons *rendement technique* de l'eau le rapport de la production à l'eau consommée : *RT. = Récolte en kg/eau consommée en* m^3.

Le rendement technique n'est pas toujours maximum pour le traitement le plus humide. Dans deux cas c'est le traitement B qui l'emporte :

Essai luzerne 1960. Traitement B. Eau consommée 4 990. RT : 1,7 contre 1,4 pour le traitement A.

Essai pommes de terre. Traitement B. Eau consommée 3 750 RT : 9,0 contre 6,3 pour le traitement A.

Dans ce dernier cas le traitement B a même donné une récolte qui n'est pas significativement différente de celle donnée par le traitement A alors que les arrosages sont plus faibles de 50 p. 100.

On voit nettement la différence de régime pour la luzerne entre une année sèche (1959) et une année humide (1960).

Précocité.

L'essai sur artichauts a permis de mettre en évidence un effet des arrosages sur la précocité plus marquée que l'effet sur la production.

Les traitements A et B sont nettement plus précoces que les autres et A plus précoce encore que B.

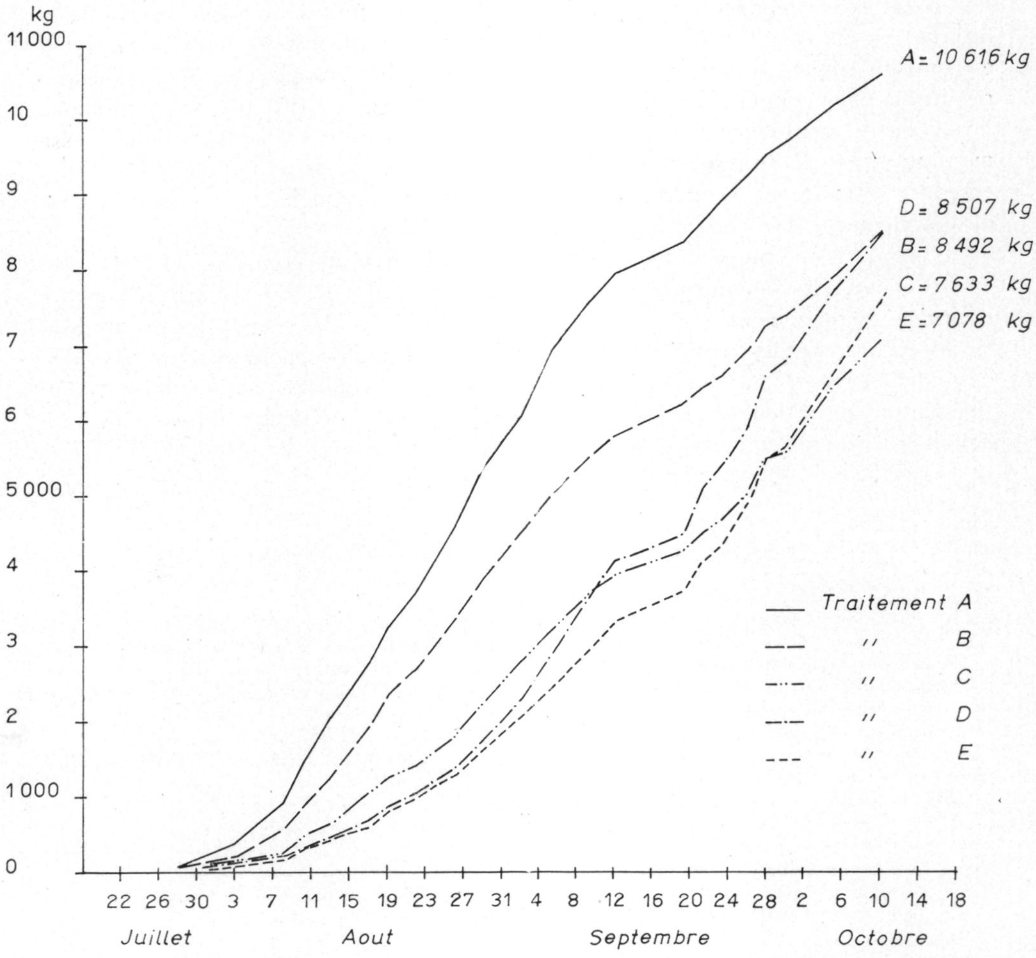
Remarquons que cet effet n'est pas toujours intéressant en soi, les cultures

TABLEAU 4

Bilan de consommaion — Récolte et rendement technique

		1959				1960						
		Luzerne				Luzerne					Pomme de terre	Artichaut
Date	3/6	9/7	14/8	6/10	T	25/3 3/5	15/6	16/7	1/9	T	26/3 22/7	30/5 1/10
Durée (jours)		36	36	52	124	43	33	31	47	154	118	123
Pluies P (m³/ha)		0	0	820	820	430	980	285	1 110	2 805	1 460	3 423
Irrigation I (m³/ha)	A	2 070	2 140	1 160	5 370	450	1 170	1 000	585	3 205	3 464	3 973
	B	1 020	1 570	390	2 980	0	578	240	635	1 453	1 910	2 601
	C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	685	3 115
	D											3 048
	E											1 775
Variation des réserves du sol ΔR (m³/ha)	A	300	— 200	— 1 320	— 1 220	1 008	— 616	— 144	416	664	396	48
	B	770	— 50	— 710	8	924	— 700	340	168	732	384	15
	C	1 200	150	— 690	390	1 152	— 1 200	1 020	— 156	816	567	— 40
	D											95
	E											— 72
Consommation totale (E = P + I + ΔR) (m³/ha)	A	2 370	1 940	660	4 970	1 888	1 534	1 141	2 111	6 674	5 320	7 444
	B	1 790	1 520	498	3 808	1 354	858	865	1 913	4 990	3 754	6 039
	C	1 200	150	— 130	1 210	1 582	— 220	1 305	954	3 621	2 712	6 498
	D											6 566
	E											5 126
Récolte « r » (kg/ha) (luzerne : en foin sec)	A	2 000	2 490	530	5 020	2 266	2 850	2 467	1 650	9 233	33 500	10 616
	B	1 420	1 770	670	3 860	2 367	2 650	2 000	1 283	8 300	11 600	8 492
	C	700	0	450	1 150	1 733	1 383	1 117	767	5 000	16 000	7 633
	D											8 508
	E											7 078
Rendement technique $RT = \frac{E}{r}$	A	0,8	1,3	0,8	1,0	1,2	1,9	2,2	0,8	1,4	6,3	1,4
	B	0,8	1,2	1,3	1,0	1,8	3,1	2,3	0,7	1,7	9,0	1,4
	C	0,6			0,9	1,1		0,9	0,8	1,4	5,9	1,2
	D											1,3
	E											1,4

d'automne peuvent être moins payées en fin qu'en début de saison mais il y a là une possibilité intéressante de régler l'échelonnement des productions.



Graphique III. — Production d'artichauts. Graphique de précocité.

III. — CONCLUSIONS ET ORIENTATION DES ESSAIS

Les premiers résultats des essais entrepris permettent une connaissance plus exacte des doses pratiquées et des humidités du sol correspondantes. Les cultures, même dans les parcelles les moins productives sont belles, la production au moins moyenne quoique les consommations d'eau soient plus faibles que dans la pratique courante et dépassent rarement 5 000 m³/ha.

Les évapotranspirations de Blaney et Criddle conservent jusqu'à plus ample informé leur valeur pratique mais il faut préciser les coefficients à appliquer selon les cultures et selon les régions.

En outre, l'étude des bilans permet de penser que certains traitements dépassent l'optimum de rendement technique. Les arrosages plus nombreux et plus copieux peuvent se justifier pour rechercher la précocité.

Nous avons renoncé à exprimer le rendement en unités fourragères (cas de la luzerne) ou en argent pour ne pas introduire une valeur unitaire dont l'estimation est souvent sujette à caution. Il sera facile à chacun d'y suppléer en accordant aux récoltes la valeur unitaire (en U. F. ou en argent) qui lui paraît la plus vraisemblable.

D'autre part le prix de revient des arrosages dépend à la fois du volume (payement au m^3) et du nombre (frais de main d'œuvre et de matériel mobile). Des études en cours permettront, semble-t-il, de donner bientôt une valeur suffisamment précise de ces éléments dans le cas particulier de nos réseaux.

L'étude économique deviendra alors possible en toute connaissance de cause.

Il conviendra de continuer les essais en éliminant avec soin les autres facteurs limitants du rendement ; entre autres la fertilité des sols. A ce sujet des profils de la richesse en azote des parcelles d'artichauts ont été réalisés pour se faire une idée de l'effet dépressif que pourraient avoir les arrosages copieux par lessivage du sol.

Enfin, en particulier sur l'essai luzerne, il conviendra de tenir compte de l'arrière action due à l'accumulation des réserves dans les racines.

Reçu pour publication en novembre 1960.

RÉSUMÉ

Dans le cadre de nouveaux réseaux d'irrigation distribuant l'eau *à la demande*, *sous pression*, les essais poursuivis ont pour but d'établir, pour une culture donnée et dans un cas particulier, la relation : rendement-humidité du sol.

L'humidité du sol est maintenue à un niveau de référence (25 cm) entre deux valeurs limites arbitrairement choisies.

Les essais poursuivis pendant un ou deux ans, comportent de 2 à 5 traitements différents avec répétition sur luzerne, pommes de terre et artichauts.

Ils ont permis de mettre en valeur :

— Les consommations d'eau dans les différents cas (sans distinguer les évaporations, les transpirations ni les percolations éventuelles).

— La productivité du m^3 d'eau consommée (rendement technique)

— Les valeurs maxima au-delà desquelles le rendement ne croit plus (cas des pommes de terre)

— Une influence des arrosages sur la précocité (cas des artichauts).

Ann. agron., 1961, **12** (1), 145-155.

631. 627 : 631. 67 (44)

PROBLÈMES POSÉS PAR LE DRAINAGE ET L'IRRIGATION DES SOLS DE BRENNE

Simone PÉRIGAUD
Station agronomique, Châteauroux.

A

Des études ont été entreprises depuis trois ans en vue de la mise en valeur éventuelle d'une région naturelle de l'Indre, la Brenne.

Il s'est rapidement affirmé que les problèmes posés n'étaient pas simples. L'aspect hydrique en particulier, soulève un certain nombre de difficultés dont il sera spécialement question dans le présent compte-rendu. Les études nécessaires sont d'assez longue haleine et ne peuvent prétendre apporter des solutions définitives au bout de deux ans seulement, elles seront simplement présentées à titre de premières observations.

Avant que ne soit abordé l'objet même de cet article, un bref aperçu pédologique sur les sols de Brenne paraît nécessaire. Les méthodes de travail seront ensuite rapidement précisées. Enfin la circulation de l'eau dans les sols et les conséquences sur les possibilités d'aménagement feront l'objet des deux dernières parties de l'exposé.

I. — Les sols de Brenne.

La Brenne correspond à une couverture éocène d'épaisseur très variable (0 à 30 mètres) sur jurassique (calcaire Rauracien) : elle est formée d'un complexe détritique de sables et d'argiles, de granulométries très variées, ici meubles, là durcis en grès plus ou moins argileux, plus ou moins ferrugineux, souvent remaniés par l'érosion.

Suivant la granulométrie et l'épaisseur des dépôts d'origine, on trouve des types de sols variés avec une tendance plus ou moins marquée à la podzolisation : profils de sables profonds avec plages d'alios vers — 40 ; sols podzoliques à sables moyens avec horizon A_2 net sur argile ; limons très fins lessivés parfois podzolisés ; sols très argileux, profonds ; sols à couches successives de granulométries très différentes ; etc...

L'hétérogénéïté apparait très grande à l'échelle même de la parcelle. Cependant quelle que soit cette variabilité, le caractère commun de tous ces sols réside dans la nature même du dépôt détritique, pauvre en bases, dans le cadre d'une région à microrelief accusé dépourvue de réseau hydrographique organisé : que l'imperméabilité du sous-sol soit due au grès lui-même ou à une argile d'accumulation désaturée, que l'horizon superficiel soit plus ou moins perméable par lui-même, on se trouve partout devant des pseudogleys. Les deux types d'hydromorphie se superposent d'ailleurs souvent : des pseudogleys à hydromorphie de profondeur seulement lorsque

l'écoulement superficiel peut se faire normalement, des pseudogleys de surface dans les cuvettes très ennoyées ou sur les sols battants.

Cet ennoyage temporaire de sols acides fait de la Brenne une région d'étangs, de bois et de landes à grandes bruyères et ajoncs ; des pacages extensifs et quelques cultures sur de grandes planches inondées l'hiver, desséchées l'été, constituent les ressources agricoles limitées de cette région de 80000 hectares.

La première étape de la mise en valeur de cette région paraît être tout naturellement l'évacuation des eaux hivernales qui entretiennent des conditions très défavorables à un enracinement normal et accentuent par là les effets de la sécheresse d'été.

Il se pose dans ces conditions deux sortes de problèmes à résoudre :

1° celui de la technique d'assainissement proprement dite. S'il paraît opportun à priori de réaliser cet assainissement par drainage, qui dispense les cultivateurs de tout entretien et permet l'emploi facile des machines agricoles, cette technique ne peut être employée que si elle est efficace ;

2° celui de la mise en valeur ultérieure des sols drainés, véritable mise en culture de terres incultes, à très faible potentiel actuel de productivité.

II. — Les méthodes d'étude.

L'hétérogénéité des sols de Brenne à l'échelle même de la parcelle aurait rendu les études pédologiques préalables systématiques très longues, sans permettre de répondre en même temps aux deux questions posées. De petits ensembles correspondant aux différents types de sols ont donc été drainés à titre expérimental par le Service du Génie Rural, avec des drains à 60 cm de profondeur espacés de 8 à 14 mètres, suivant la granulométrie moyenne rencontrée. Sur ces parcelles, la Station Agronomique suit, depuis le drainage datant actuellement au maximum de deux ans, le comportement des sols sous le double aspect structuralet cultural. Les études sur le terrain se complètent par des mesures au laboratoire. Elles se font toujours dans le cadre de parcelles d'essai où une expérimentation culturale est entreprise.

1° Profils hydriques

Les profils hydriques ont été suivis tant en réhumectation qu'en dessiccation par carottages répétés au cours de l'année. L'hétérogénéité extrème de ces sols nous a obligé à adopter une technique un peu particulière : à chaque endroit étudié, un profil type est retenu et les sondages ne sont gardés que s'ils répondent à ce type; pour garder deux sondages, il peut être nécessaire de faire quatre ou cinq trous. Cette méthode n'est pas exempte de toute critique et ne donne de résultats à peu près valables que lorsque la variation de granulométrie n'est pas trop grande. Il est bien évident qu'une mesure toujours au même point avec une sonde en place serait meilleure.

2° Examen de l'état du terrain.

et, en période hivernale, de l'écoulement des drains au collecteur. Sur ce point particulier, l'observation et les mesures de débit ne peuvent s'interpréter que lorsque le collecteur évacue l'eau d'un ensemble suffisamment homogène.

3° *Examen du profil*

sous le double aspect structure et enracinement — mesures de densités apparentes.

4° *Au laboratoire*

Analyses mécaniques classiques des différents horizons — et autres analyses courantes en pédologie (pH, matière organique, C/N, analyses chimiques de fertilité, etc...).

5° *Analyses d'agrégats*

et tests de perméabilité par la méthode Hénin.

6° *Mesures de capacité de rétention*

par succion sous dépression controlée jusqu'à équilibre.

Il n'est pas apparu opportun, dans le cas de la Brenne, de prévoir les cubes Vergières surtout à cause de la présence systématique de vieilles racines mal décomposées d'anciennes « brandes ». De même, des mesures de perméabilité de sols en place seraient difficiles dans les sols très instables à l'eau tels qu'ils vont être décrits ci-dessous.

III. — La circulation de l'eau dans les sols de Brenne.

Certains types de sols se réhumectent et se dessèchent normalement, ce sont les profils de sables sur argile profonde (à plus de 70 cm), certains sols argileux bien structurés (bordure Nord de Brenne, contact avec les calcaires du Turonien), quelques sols lessivés à hydromorphie peu accentuée. Ces sols ne posent pas de problèmes.

A l'opposé, deux types semblent mal réagir au drainage par poterie : les pseudogleys podzoliques à horizon « A2 » très accusé et les « limons ». Ce sont d'eux qu'il sera question ici, étant bien entendu qu'il existe sur le terrain toutes les nuances et tous les intermédiaires.

1° *Les sols dits à horizon A2*

Le profil se présente de la façon suivante :

0 — 25 sables assez fins (localisés vers 200 μ), peu limoneux et peu argileux, Humifiés, noirs. Structure particulaire, sans cohésion. Zone très exploitée par les racines,

25 — 55 mêmes sables assez fins, mais décolorés, blancs avec taches de fer. Structure cimentée, très bétonnée l'été, boueuse l'hiver. Très peu exploité par les racines,

au dessous de 55 argile à structure prismatique à très grosses mottes (10 cm environ) et refentes horizontales — très compactes, séparées par des restes ligneux d'anciennes racines de « brandes ». Racines actuelles peu nombreuses.

Les caractéristiques diverses de ce profil sont fournies dans le tableau 1.

Les capacités de rétention sont ici données à titre indicatif seulement : la méthode employée par succion s'est avérée donner des résultats douteux — ils sont bien reproductibles à 5 p. 100 près mais à l'intérieur de deux gammes de chiffres très différents, dont la plus élevée est très supérieure à la capacité au champ (déduite des profils hydriques). Dans le cas situé plus haut, deux catégories de chiffres ont été obtenus, par exemple pour la couche superficielle 13 et 20 p. 100, pour une capacité au champ de 13 ou 14 p. 100.

M. FÉODOROFF, dans une communication verbale récente, a confirmé obtenir des résultats semblables dans le cadre de ses Recherches en cours sur la stabilité structurale.

Des mesures faites par pression il y a deux ans par M. HALLAIRE à la Station de Bioclimatologie sur des échantillons semblables paraissent donner des résultats beaucoup plus systématiquement comparables aux capacités aux champs. La question est actuellement reprise avec M. HALLAIRE et parrallèlement des mesures sont essayées par centrifugation dans un champ de 1000 g sur les mêmes échantillons.

TABLEAU I

Quelques caractéristiques d'un sol podzolique à pseudogley.

Profondeur	0 - 25	25 - 55	55 - 70
Argile %	9	10	42
Limons et sables inférieurs à50μ %	20	22	18
Matières organiques %	1,7	0,5	0,5
C/N	13		
pH	6,6	7,0	5,0
Taux de saturation%	98	100	87
Test de perméabilité (K Hénin)	3,4	0,4	0,1 à 0,2
Indice S (Hénin)	0,62	4,0	7,0
Capacité de rétention (mesurées au laboratoire)	13	10,5	25

Il s'agit ici d'un profil sous prairie à base de trèfle blanc — dactyle. Le même profil sous plantes sarclées (maïs) donne en fin de végétation, en surface, des tests Hénin différents, confirmant le rôle favorable de la prairie sur la stabilité structurale.

	Sous prairie (0-25)	Sous maïs (fin de végétation) 0-25
Indice S	0,6	1,1
Test K (Hénin)	3,4	1,7

Les caractéristiques des sous-sols sont les mêmes.

Les premières mesures de profils hydriques ont commencé fin novembre 1959, un an après le drainage et à un moment où la réhumectation du profil était amorcée. Pratiquement, l'écoulement des drains commence bien avant que cette réhumectation soit totale.

Les différentes humidités relevées aux dates les plus caractéristiques ont été précisées dans le tableau 2, traduits sur la figure 1. Le profil du 23 mars correspond sensiblement à la capacité au champ.

TABLEAU 2

Date	Surface 0 - 25	A2 25 - 55	Argile 55 - 70
23 novembre	15	11	19,5
7 janvier	(0-15) 18 (15-25) 23 (gorgé d'eau)	11 (ressuyé)	19,5
6 février	21 en boue, sol mouvant	13,5 eau libre	20,5
23 mars	17	11	21
22 avril	15	11	[21,5
21 juin	3,8	4	18,5
22 juillet	2,7	2,8	17,3

Les mesures obtenues et les observations répétées sur le terrain montrent que les eaux de pluie s'infiltrent très lentement dans l'horizon A_2 de sables blanchis, très bétonnés par la dessiccation. C'est cet horizon, sableux d'après l'analyse mécanique, qui forme le premier écran imperméable et maintient en véritables « sables mouvants » a couche superficielle lorsqu'elle est nue. Cet horizon finit d'ailleurs par se gorger d'eau lui-même. Mais l'argile sous-jacente reste à une humidité pratiquement constante probablement inférieure à l'humidité équivalente.

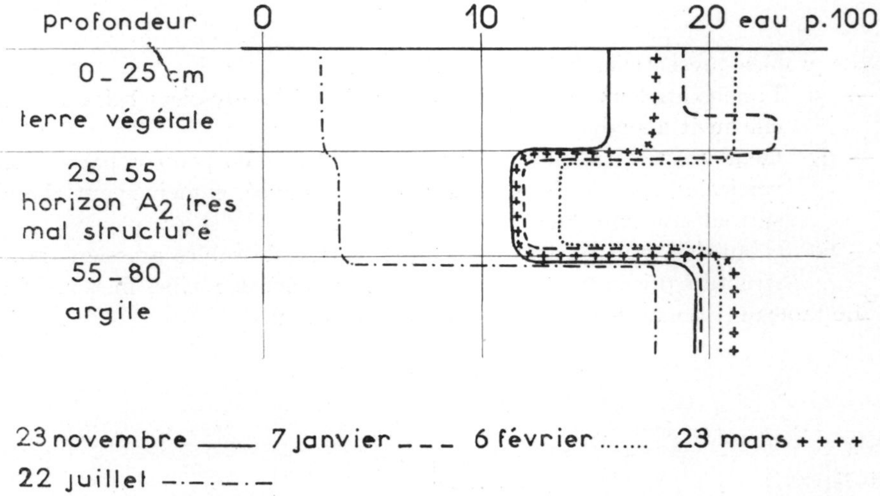


FIG. 1. — *Profil hydrique d'un sol podzolique à pseudogley (1959-60)*

Le profil de dessiccation complète les observations précédentes : l'argile du sous-sol cède très peu d'humidité tandis que la surface et l'horizon A_2 tombent à un degré d'humidité inférieur aux points de flétrissement permanent antérieurement déterminés par M. HALLAIRE sur des sols de ce type (pF 4,2 mesurés sur ce type d'horizon A_2 : 2,6 à 3,8 p. 100 d'eau).

Les examens des enracinements de différentes plantes ont été faits systématiquement et ont mis en évidence un arrêt brutal de l'extension radiculaire au contact de cet horizon colmaté. Certaines plantes comme la betterave sont à peu près complètement bloquées. D'autres ne le sont que partiellement : trèfles blancs et dactyles le

traversent péniblement. Les jeunes luzernes (luzerne du Poitou à enracinement pivotant) marquent un temps d'arrêt net à ce niveau, emettent des racines horizontales qui filent à cette limite, mais réussissent finalement à pousser un pivot qui s'incruste lentement net et nu jusqu'à l'argile où l'on retrouve une petite ramification. D'ailleurs la luzerne paraît être la seule plante parmi celles qui ont été expérimentées, susceptible de décaler le profil hydrique en profondeur vers le dessèchement. Le maïs-grain s'implante bien dans les cas qui ne sont pas trop extrêmes.

Il convient de signaler que pratiquement entrent dans ce type de sols, deux natures différentes d'horizons argileux se distinguant au laboratoire uniquement par les test d'instabilité structurale, comme le montre le tableau 2.

Horizons argileux du sous-sol	1er type	2e type
Indice S	5 à 7	1,6 à 2
K (Hénin)	0,1 à 0,4	2 à 3

Des études en cours sur les natures des argiles et des ciments apporteront peut-être une explication à ces comportements différents au laboratoire. Sur le terrain, ces deux sous-sols argileux se distinguent également : le plus stable à une meilleure perméabilité en hiver ; en mai, juin et juillet il a cédé quelques réserves en eau qu'il a récupérées par les pluies d'août et septembre (l'humidité est passée de 16 à 20 p. 100).

2° *Les Sols de limons*

Le profil se présente ici de la façon suivante :

0 — 20 Limons argileux, contenant très peu de sables grossiers, beige ocré, enracinement abondant,

20 — 35 même texture très fine un peu plus argileuse, un peu compacte à fentes verticales, un peu décoloré, surtout marmorisé, enracinement abondant surtout à la limite de l'horizon suivant,

35 — 60 et au delà horizon très argileux dépourvu de sables grossiers, foncé, à structure prismatique assez grossière. Présence de racines fines jusqu'à 70.

Le tableau 3 donne les caractéristiques de ce profil.

TABLEAU 3

Profondeur	0 - 20	20 - 35	35 - 60
Argile. %	17	21	62
Limons + sables très fins	42	45	23
Matière organique %.	2,2	1,4	0,8
C/N	12		
Taux de saturation	6,8	7,2	5,0
Indice S	2,5	1,3	0,9
K (Hénin)	1,4	1,7	3,2
Capacités de rétention (mesurées)	29 ou 35	35	41 et 48

La perméabilité la plus faible est ici en surface. Elle dépend d'ailleurs beaucoup de la culture (indice S passant de 1,3 à 2,5 suivant le précédent).

Les capacités de rétention sont données également à titre indicatif, avec les deux séries de chiffres obtenus — même la plus faible est ici supérieure à la capacité au champ.

Le profil hydrique est aussi assez caractéristique : tableau 4 et figure 2). Il correspond ici à une culture de blé.

TABLEAU 4

Date	Surface	20-35	Argile du sous-sol	
			35-50	50-80
23 novembre	18	22	29	29
8 janvier	22 (eau en surface)	22,5	29	29
2 février	26 (gorgé d'eau)	28 mouillé	31,5 humide	29 bien ressuyé
25 mars	20,5 (ressuyé)	22	27,5	26,5
22 avril	18	17	27	27
30 juin	15	13	22	19
23 juillet	11,5	11,7	22	20,5

Le profil du 23 mars correspond sensiblement à la capacité au champ.

L'eau reste longtemps en surface sans imprégner la masse, puis la terre végétale finit par être véritablement gorgée d'eau tandis que les drains coulent toujours faiblement. Au dessous, des tranches de sols se gorgent d'eau successivement pour aboutir, en avril, sensiblement à l'équilibre que l'on avait fin novembre.

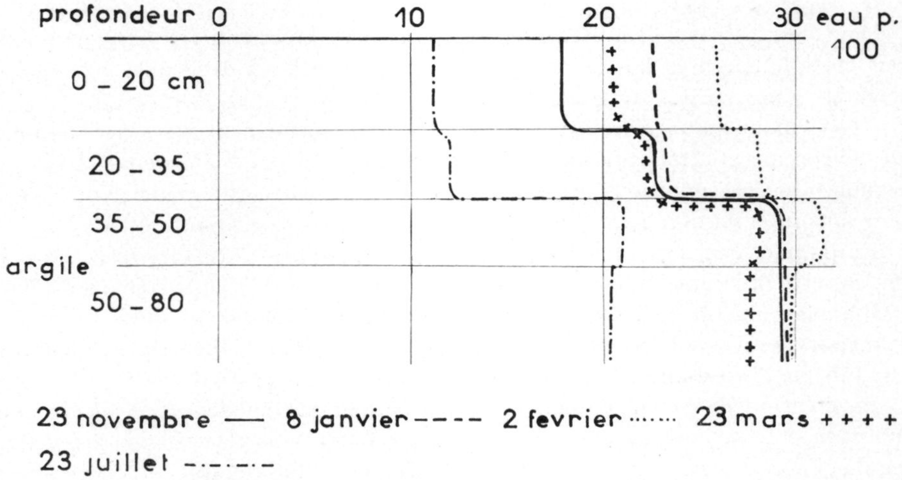


FIG. 2. — *Profil hydrique d'un sol de limons* (1959 - 60.)

A la dessiccation progressive des 35 premiers centimètres bien occupés par les racines, s'ajoute celle de l'horizon très argileux qui livre aussi progressivement ses réserves en passant de 27 p. 100 d'eau en avril à 20 p. 100 en juillet.

Après les pluies d'août et septembre derniers, l'humidité du sous-sol argileux était remontée à 27 p. 100. Le blé non déchaumé était à ce moment remplacé par une pousse abondante d'herbes annuelles et vivaces : comme il l'a été vérifié en plusieurs endroits, la réhumectation des horizons profonds semble se faire beaucoup plus facilement en période d'évapotranspiration relativement forte à partir des pluies d'été

qu'en période de pluies hivernales qui imperméabilisent rapidement les horizons supérieurs à structure très instable à l'eau.

Ce type de sol fournit donc davantage de réserves en eau que le précédent et permet une meilleure résistance à la sécheresse. Mais la perméabilité très faible de la surface limoneuse est très défavorable à une efficacité normale d'un réseau de drainage par poterie. Cette perméabilité est si faible que des racines de maïs-grain — plante semée tardivement au printemps en sol bien ressuyé, ont été trouvées fortement gainées de rouille en septembre, le milieu était devenu réducteur en surface dès les pluies de fin d'été.

On rencontre aussi des types limoneux à horizon A_2 très instable et pratiquement imperméable.

IV. — CONSÉQUENCES SUR LES POSSIBILITÉS D'AMÉNAGEMENT DE CES SOLS.

Des drainages par poterie ont ainsi été réalisés sur différents secteurs et ont permis de tirer quelques conclusions sur le drainage et l'irrigation des sols de Brenne.

1° Le drainage

Dans les cas assez nombreux de sols podzolisés à horizon A_2 nettement différencié et de limons très fins, le drainage n'a pas apporté, en deux ans, une solution efficace à l'ennoyage des terrains.

Il est connu qu'un réseau de drains ne remplit pleinement ses fonctions qu'au bout de trois ans et cette « ancienneté » n'est pas encore atteinte en Brenne. Toutefois, il semble que les conditions structurales sont trop mauvaises pour permettre un espoir sans intervention complémentaire.

En premier lieu, l'établissement d'un réseau de drains plus serré peut dans certains cas être favorable : dans les premiers essais, l'horizon A_2 était considéré comme un sable bien filtrant et des écartements de 12 mètres comme suffisants. Or il a été vérifié par des profils hydriques entre drains, que le ressuyage est meilleur près d'eux lorsque l'instabilité n'est pas trop accentuée.

La création de planches bien modelées permettrait évidemment de diminuer l'importance de l'ennoyage. Mais un tel aménagement dans cette région à relief très irrégulier nécessiterait un premier investissement considérable. Il nécessiterait surtout, dans ces sols très instables, un entretien constant des fossés qui s'éboulent. La structure humaine de la Brenne laisse penser qu'il faut trouver une autre solution d'avenir.

L'assainissement par drainage est une solution plus facile pour l'agriculteur. Mais en tout état de cause, l'amélioration de la structure de cet horizon A2 des sols podzoliques paraît indispensable. Très cimenté dès qu'il est sec, il forme un obstacle mécanique aux racines dans la période de leur développement intense. Brisé par sous-solage, l'obstacle serait détruit, mais le travail sans lendemain puisque la stabilité à l'eau de cet horizon est particulièrement mauvaise.

Le seul espoir reste probablement dans le développement forcé d'un système

radiculaire puissant capable de « tenir » cet horizon et d'y laisser des résidus organiques.

Différentes espèces ont été essayées cette année et ont permis de retenir la luzerne et, à un degré moindre, le maïs — mais si l'implantation de la luzerne a pleinement réussi, l'avenir seul permettra de voir si cette plante doit résister à un ennoyage prolongé de ses racines. Le ray-grass d'Italie n'a pas pu être essayé cette année sur ces types de sol mais sera testé en 1961.

Outre le choix des espèces adaptées, l'aspect chimique n'est pas à négliger : ces sols drainés plus ou moins incultes jusqu'alors sont particulièrement pauvres et les habitudes ancestrales de fumure très superficielles (après le labour)m aintiennent le sous-sol dépourvu de tout élément fertilisant.

Ne serait-il pas possible de réaliser une localisation de scories et de chlorure de potassium en profondeur, vers — 35 — 40, avant de labourer pour préparer un semis de prairie ?

En ce qui concerne les sols de limons à structure superficielle très instable (qui peut se doubler d'une mauvaise structure profonde), l'amélioration en surface est un problème bien connu. Des implantations de prairies à base de dactyle ou fétuque ou ray-grass ont été réalisées et permettront de voir si l'amélioration est suffisante pour rendre efficace le réseau de drains. Mais, de mesures comparatives sous vieux pacage et sous plantes sarclées, il se confirme qu'un retour même très bref à une plante laissant le sol nu en période pluvieuse risquera de compromettre l'amélioration acquise sous prairie. La question de l'assolement à respecter restera fondamentale.

2° L'irrigation

Les profils hydriques ont permis d'évaluer les réserves en eau effectivement utilisées par la végétation dans les différents types de sols Elles sont très faibles, variant de 30 à 40 mm pour les sols les plus « secs (les sols podzoliques sont souvent plus secs que les profils de sables grossiers). Les limons ont cédé en moyenne 75 à 80 mm, chiffre peut-être sous-estimé, les profils n'ayant été suivis que jusqu'a 90 cm en un sol où des mouvements d'eau ascendants ont été reconnus.

La faible réserve utilisée dans les sols sableux ou podzolisés, est liée d'abord à la superposition de couches de granulométries très différentes, sables sur argile qui provoque la rupture brutale des mouvements d'eau ascendante. Elle est due surtout à un enracinement très déficient, localisé en surface, presqu'inexsistant en profondeur.

Le décalage des profils en dessèchement sous luzerne montre que la réserve du sous-sol peut être utilisable s'il est exploité. Et l'utilisation de cette réserve, qui provoque un retrait des argiles, ne peut qu'être favorable à une perméabilité de fissure plus grande, à un mouvement d'eau libre plus intense vers la profondeur, au début des pluies.

Toutefois, la faible importance actuelle des réserves en eau fait songer à l'inrétêt d'irrigations de complément là où les investissements de base doivent être faibles notamment en bordure des grands étangs, Des essais seront mis en place l'année prochaine.

La conduite des irrigations des sols de Brenne pose quelques problèmes : il semble nécessaire de prévoir de faibles doses répétées puisque les réserves sont faibles et surtout où, en présence d'un horizon A_2, un léger excès d'eau, par rapport à ce que

peut retenir la terre végétale très sableuse, peut créer, entre 30 et 45 mm des conditions anaérobies très défavorables aux racines en pleine période de végétation.

Mais par de petites doses répétées, seules les racines superficielles vont se développer abondamment et l'irrigation dans ces conditions ira à l'encontre même de ce que l'on recherche pour l'amélioration de la structure en profondeur par les racines.

Il semble à première vue défavorable de concevoir des doses tendant à satisfaire l'évapotranspiration potentielle. Notre programme d'expérimentation pour l'année prochaine tendrait plutôt à exiger du végétal une relative adaptation à la sécheresse par des arrosages limités aux périodes de besoin en eau intense de la plante : périodes critiques du maïs, jours suivant la coupe d'une prairie.

Additif

Depuis la rédaction de cette publication les mesures des humidités correspondant à différents potentiels capillaires ont été faites par M. HALLAIRE sur les 3 horizons des 2 profils étudiés.

Les humidités aux pF 2,7 3,0 et 4,2 sont données dans le tableau ci-dessous :

	Humidité à		
	pF 2,7	3,0	4,2
Sol podzolique à pseudogley			
0-25	10,5	9,0	3
25-55	8,0	6,5	2,0
55-70	22	19	11
Sol de limon			
0-20	22	18	31
20-35	18	15	28
35-60	7	8	17

Ces chiffres, qu'il convient de reporter sur les schémas des profils hydriques (fig. 1 et 2) confirment les observations sur le terrain :

1° Dans les sols à structure instable comme en Brenne, l'humidité des couches superficielles se maintient très longtemps après les pluies en période d'évapotranspiration faible, supérieure à « l'humidité équivalente ».

La notion de « capacité au champ » est mal définie, liée comme le confirment des essais en cours, à la compacité du moment et à l'intensité de la pluie.

2° Le sous-sol argileux ne se réhumecte pas totalement et surtout ne cède pas toute son eau disponible.

3° Dans de tels sols, l'évaluation des « réserves en eau » par les mesures classiques d'humidité équivalente et de point de flétrissement permanent apparaissent très arbitraires : celles-ci ne reflètent pas l'état des lieux actuels.

Si des mesures sur les sols en place paraissent plus sûres, malgré toutes les difficultés et toutes les incertitudes qu'elles présentent, il ne faut pas oublier toutefois qu'elles ne préjugent pas de l'évolution que le sol peut subir par la suite sous l'influence des techniques d'amélioration de la structure.

V. — CONCLUSIONS.

Les éléments apportés ici ne sont pas nouveaux ni très constructifs. Ils cherchent seulement à montrer que les problèmes posés par la mise en valeur de sols podzoliques hydromorphes, souvent limoneux comme en Brenne, ne peuvent pas se résoudre de

façon simple et classique. D'autre part le côté chimique et biochimique n'a pas été abordé ici.

Sous le seul aspect dynamique de l'eau qui fait l'objet de ce compte-rendu, les difficultés rencontrées soulèvent de nombreux problèmes de Recherche qu'il est nécessaire d'aborder sous l'angle de plusieurs disciplines.

Reçu pour publication en novembre 1960.

RÉSUMÉ

L'étude de la réhumectation et de la dessiccation de deux types caractéristiques de sols de Brenne a mis en évidence le mode particulier de circulation de l'eau dans les profils hydromorphes, à horizon nettement différenciés, dépourvus d'une structure nette et très instable à l'eau.

Il ressort de cette étude les points suivants :

1 — L'efficacité limitée d'un assainissement par drains en poterie dans l'état actuel de ces sols.

2 — La nécessité, si l'on veut rendre ces sols normalement utilisables, de leur créer une structure puis de maintenir celle-ci.

3 — La difficulté pour concilier, dans ces sols à la fois secs et imperméables, l'oligation d'une amélioration de leur structure en profondeur et l'utilité d'irrigations par aspersion.

4 — Sur le plan plus général :

— La signification limitée dans ces cas des mesures classiques d'humidité équivalente servant à définir les réserves en eau disponibles d'un sol.

— Le caractère essentiellement évolutif dans le temps de cette notion de « réserves hydriques ».

— La bonne corrélation existant entre les tests HENIN et les cas de mauvaise perméabilité par défaut de structure.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 157-168.

631. 811. 91 : 581. 144

DYNAMIQUE RADICULAIRE ET ALIMENTATION EN EAU DES VÉGÉTAUX

A. VERNET et R. CHAUSSAT A

Laboratoire de Recherches de la Chaire d'Écologie et de Physiologie végétale, Institut national agronomique, Paris

INTRODUCTION

Il est classique de distinguer en physiologie végétale l'absorption active de l'absorption passive. Par absorption active on entend un mode d'absorption avec dépense d'énergie qui ne se produit pour l'eau qu'en conditions de transpiration réduite et lorsque le sol est très humide.

Par contre, l'étude de l'alimentation en eau des végétaux présente toute son importance en période sèche, lorsque l'intensité de la transpiration est forte et le sol peu humide. Dans ce cas, on peut encore observer que les individus vigoureux, ou disposant d'importantes réserves dans leurs tissus, souffrent moins de la sècheresse. L'ombrage, par contre, qui réduit l'intensité de l'assimilation chlorophyllienne, condamne nombre de plantules à mourir par dessiccation. Pour ne pas employer le terme d'absorption active qui prêterait à discussion, on pourrait employer celui d'absorption dynamique. La croissance des racines devient en effet une nécessité pour la survie de la plante dès que le volume du sol, occupé par le système radiculaire déjà en place, est ramené au point de flétrissement permanent. Or la croissance des racines est subordonnée à l'existence de réserves (cas des plants issus de grosses boutures, dont la reprise est mieux assurée que pour ceux issus de petites boutures), ou à l'élaboration de substances nutritives par les feuilles.

Il paraît donc nécessaire de distinguer en écologie 1°) l'absorption de l'eau dans le volume de sol déjà occupé par le système radiculaire. 2°) L'absorption de l'eau dans la zone extérieure au volume précédent, grâce à la progression du front radiculaire.

A partir d'observations, souvent anciennes ou incomplètes, faites en Tunisie (A. VERNET, P. GAY, Y. MILLET) et à l'I. N. A. (A. VERNET, R. CHAUSSAT, H. PRADINES) nous allons essayer de présenter cette question.

L'exposé comprendra deux parties :

(1) L'absorption de l'eau est suivie dans le sol d'une luzernière dont le système radiculaire peut être considéré comme étant en place. L'absorption a lieu par préférence dans les couches de sol les moins profondes et l'exploitation des réserves du sol se fait par la progression d'un front de dessèchement.

1) En irrigations mensuelles.

2) En irrigations bimensuelles.

Inversement, en admettant que l'absorption demande une moindre dépense d'énergie quand elle a lieu au voisinage de la surface du sol, nous chercherons à voir si les rendements augmentent avec la fréquence des irrigations.

(II) Le front de dessèchement va donc se propager à partir du collet de la plante à travers le volume déjà, occupé par les racines (paragraphe I). Sa vitesse de propagation est alors conditionnée par le débit transpiré. Quand le front de dessèchement aura atteint le front radiculaire, sa vitesse de progression doit être conditionnée par la croissance des racines.

Soit :

H_c la capacité au champ,

H_f le point de flétrissement permanent,

D la densité apparente.

$u = D (H_c\text{-}H_f)$ est l'humidité utilisable par unité de volume.

Admettons pour simplifier l'exposé que, de part et d'autre du front de dessèchement, l'humidité passe brusquement de H_c à H_f.

Soit :

V_1 Le volume total occupé par les racines.

V_2 Le volume de sol desséché.

Q L'eau disponible.

t Le temps.

$$Q = uV_1\text{-}uV_2$$

$$\frac{dQ}{dt} = u\frac{dV_1}{dt} - u\frac{dV_2}{dt}$$

$q_2 = u\frac{dV_2}{dt}$ = Débit d'eau transpiré par la plante.

$q_1 = u\frac{dV_1}{dt}$ = Gain d'eau disponible en raison de la croissance radiculaire.

Si $q_2 > q_1$ le front de dessèchement atteindra le front de croissance des racines et la transpiration végétale devra se réduire.

Nous n'avons pas étudié ce point qui fait partie de l'exposé de DAMAGNEZ. Nous n'avons fait qu'examiner les valeurs que peut atteindre $\frac{dV_1}{dt}$ dans diverses conditions.

Soit « l » la longueur des racines principales, nous écrivons :

$$\frac{dV_1}{dl} = u\,\frac{dV_1}{dl}\cdot\frac{dl}{dt}$$

Et nous étudierons successivement.

A) $\frac{dV_1}{dl}$: L'accroissement du volume occupé par les racines en fonction de l'allongement des racines principales dépend de la forme de ce volume.

1°) *Volume sphérique*, cas des plantes isolées.

2°) *Volume cylindrique*, cas des plantes incluses dans un couvert végétal dense (fermé).

B) $\frac{dl}{dt}$: La vitesse de croissance des racines dépend de nombreux facteurs, en particulier de l'humidité du sol.

L'étude de la vitesse de croissance des racines principales de jeunes plantules de blé nous permet d'introduire dans cet exposé quelques observations écologiques.

Cas du pot de fleur
Destruction des emblavures par une pluviométrie d'automne insuffisante
Effet du labour profond
Développement du blé après jachère travaillée sur une seule pluie.

I. — ABSORPTION DE L'EAU PAR UN SYSTÈME RADICULAIRE EN PLACE (SIDI TABET 1953)

Une luzernière expérimentale de très belle venue a été irriguée après la première coupe, le 10 juillet, de façon à ramener le sol à saturation sur toute son épaisseur ; 35 mm de pluie tombaient le 5 Août (P).

L'humidité du sol (H) a été périodiquement dosée en divers points de parcelles recevant ; soit une irrigation de saturation après chaque coupe, tous les mois, (points II et III) ; soit une demi-dose tous les quinze jours, (points I et IV).

Ces dernières irrigations, à doses trop faibles pour les cuvettes, réhumidifiaient irrégulièrement le sol.

L'humidité équivalente H_e était, pour chaque échantillon, mesurée à la centrifugeuse. L'erreur sur $H\text{-}H_e$ étant trop élevée, nous avons pris pour chaque horizon une valeur moyenne : $\overline{H}e$.Ce sont les valeurs de $H\text{-}\overline{H}e$ qui ont été portées sur les graphiques.

1) *Irrigations mensuelles* :

Quantités d'eau absorbée par la luzerne au point III ($D \neq 1{,}45$) en m^3 ha

Profondeurs *en cm.*	Dates 10-7	20-7	30-7 11-8	Total
0-30	265	208	0 + P	473 + P
30-60	104	348	0	452
60-90	17	270	152	439
90-120	2	30	152	184
Total	388	856	304+ P	1 548 +P

La valeur moyenne de H-He, pour les points II et III à différentes profondeurs a été portée sur le graphique I. L'humidité équivalente ne paraît être voisine de la capacité au champ que dans les couches de surface (0,30). Dans le sous-sol on trouve des humidités très supérieures à l'humidité équivalente mesurée à la centrifugeuse. L'intersection des courbes avec l'ordonnée zéro indique cependant que la force de succion du sol est à cette date de l'ordre de 1/3 d'atmosphère.

On peut observer, bien que le système radiculaire soit en place, que :

a) La plante exploite l'eau du sol par horizons successifs à partir de la surface.

b) La pluie du 5/8 paraît avoir été léchée par le système radiculaire superficiel.

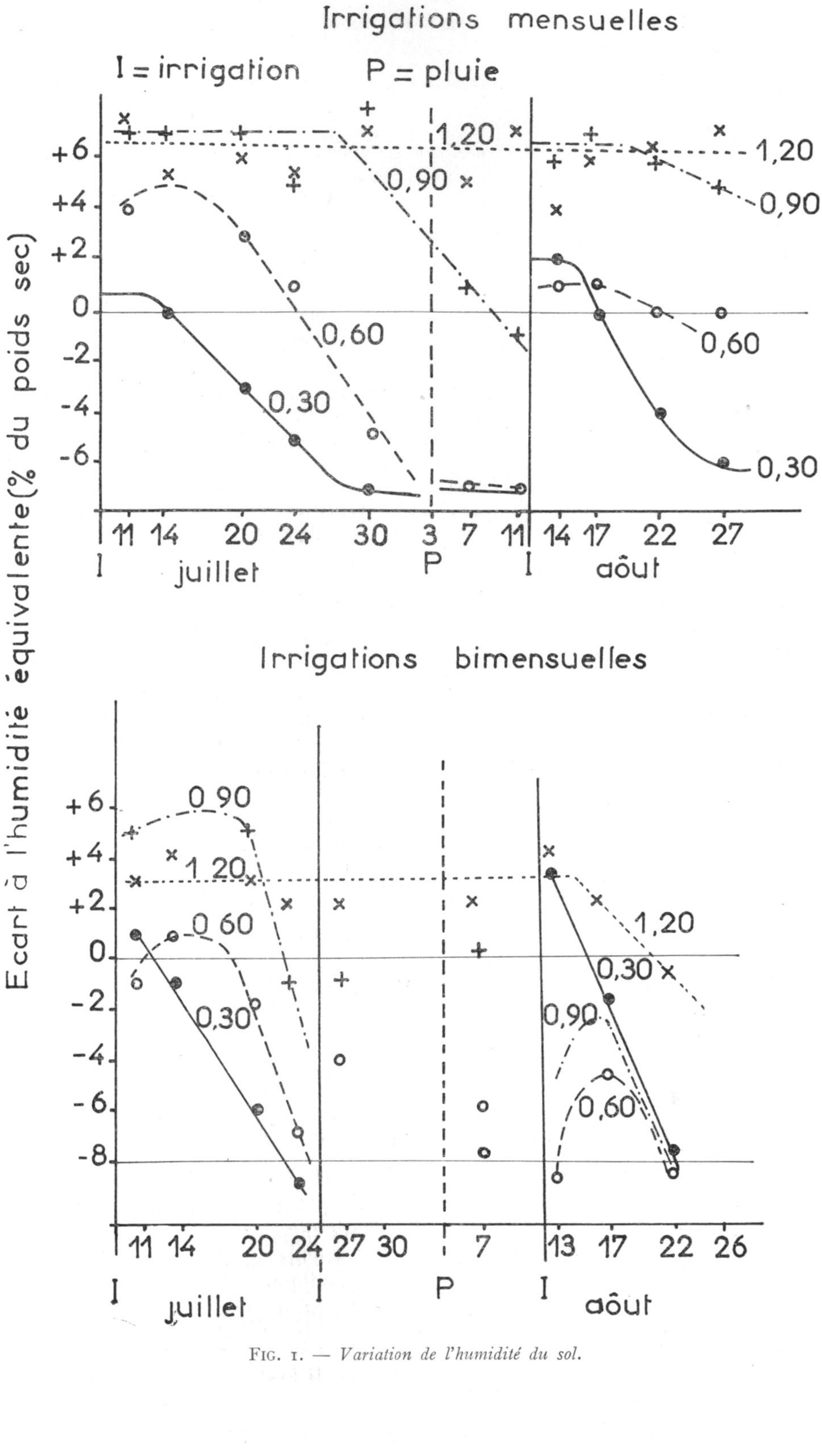


FIG. 1. — *Variation de l'humidité du sol.*

2) *Irrigations bimensuelles* :

Sans doute en raison de la mauvaise méthode d'irrigation, de grandes irrégularités sont observées dans les valeurs de H-$\overline{\text{H}}$e. Nous donnons cependant les courbes

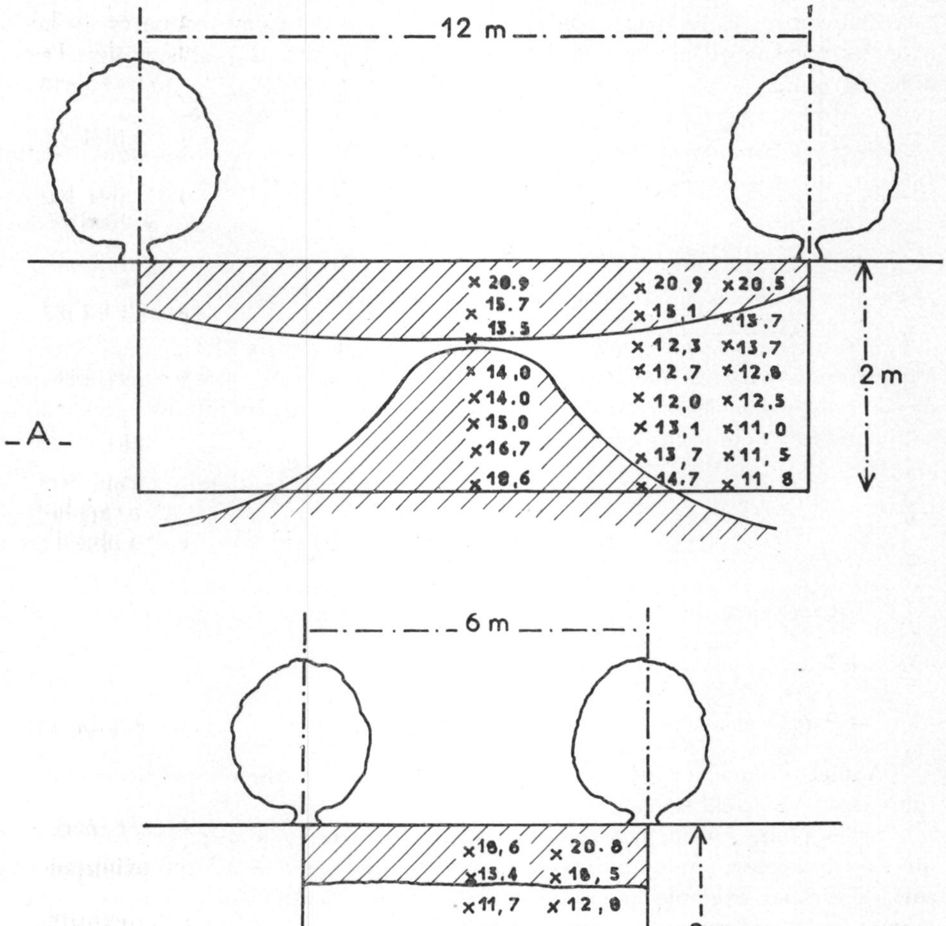


FIG. 2. — *Humidité du sol* (*Tunis, le* 1-2-61).
A — Enracinement de type sphérique.
B — Enracinement de type cylindrique.
(Mesures de Damagnez et de Villèle).
Essai de densité de plantation d'oliviers. Age 5 ans.

correspondant au point IV. Le défaut d'irrigation et la texture plus grossière du sol ont permis une légère dessiccation à 120 cm.

Nous observons donc l'absorption à proximité qui a été montrée au laboratoire par BROUWER (1) lorsque, dans la plante, l'eau était mise sous tension. Peut-on en déduire que la croissance doit être plus rapide quand la plante prélève l'eau dans les couches de surface ?

La courbe de croissance de la luzerne (matière sèche) obtenue par prélèvements périodiques au hasard est pratiquement rectiligne.

Par contre, le rendement en poids vert de la deuxième coupe des parcelles irriguées mensuellement et bimensuellement, (4 répétitions), est significativement différent.

2.170 K. contre 3.050 K sur 24 ares

En 1956, au Centre d'Étude de l'eau de Tunis, F. CORRIOLS obtenait les résultats suivants sur trois coupes de luzerne, la dose totale étant le même.

	Nombre d'irrigations entre deux coupes en 22 jours		
	1	2	4
Rendements en matière sèche : q/ha	82	90,3	94,3

Les différences sont significatives au seuil de 0,05 ; mais elles peuvent être dues à d'autres facteurs tels que la différence de fertilité chimique entre les divers horizons du sol. Il est probable que dans bien des cas, la fréquence des irrigations a plus d'action sur la qualité des produits que sur le rendement.

II. — DYNAMIQUE RADICULAIRE

A) $\frac{dV_1}{dl}$ (Croissance du volume radiculaire en fonction de l'allongement des racines principales.)

1. — *Plantes isolées ou à grands écartements-Volume radiculaire du type sphérique*

Admettons que la zone occupée par les racines soit grossièrement hémisphérique, (plus exactement ellipsoïdale).

Si les pluies sont déficitaires, Q ne dépend pas de V_1, mais de la quantité d'eau qui s'est infiltrée à l'aplomb du système radiculaire; il est lié à l'impluvium, dont la surface est par exemple la moitié de celle du front radiculaire. L'impluvium est maximum de même que la surface du front radiculaire. La pluie et la croissance radiculaire ont le maximum d'efficacité.

2. — *Plante incluse dans un couvert végétal dense (Volume cylindrique)*

L'extension du système foliaire ou radiculaire est limitée schématiquement à un espace cylindrique dont la section droite est de surface constante S.

$\frac{dV_1}{dl}$ =S est constant et égal à la surface de l'impluvium, S est généralement faible par rapport à V_1. A l'entrée de la saison sèche, il faut donc que V_1 soit plus étroitement en rapport avec les besoins ultérieurs de la plante. La densité de plantation marque quand les systèmes radiculaires se gênent.

La différence entre systèmes radiculaires, du type sphérique et cylindrique, est d'autant plus accentuée que le sol n'est pas homogène ; les horizons de surface étant, en règle générale, plus favorables au développement radiculaire.

Nous avons pu voir à Sfax, après deux années pratiquement sans pluie, (1945, 1946 = 67 mm ; 1946 — 1947 = 50 mm,) les jeunes oliveraies rester vertes et faire de la pousse alors que les plantations adultes souffraient plus ou moins intensément. Et cependant, les arbres sont plantés à 24 m. d'écartement pour que, même adultes, ils aient encore un système radiculaire du type sphérique. Pour une telle sécheresse les écartements de 20 m. étaient définitivement insuffisants puisque la souffrance a pu aboutir à la mort de certains arbres.

B) $\frac{dl}{dt}$ (Vitesse de croissance des racines)

La vitesse de croissance des racines dépend de l'intensité de la fonction chlorophyllienne ou des réserves de la plante, et des caractéristiques physiques et chimiques du sol. Dans le cas de jeunes plantules, disposant encore des réserves du grain, interviennent surtout : la compacité, l'aération, la température et l'humidité du sol.

Le graphique 3 donne, à titre d'exemple, la croissance de la racine primaire de plantules de blé à $21^o \pm 1^o$, entre le 3^{eme}. et le 6^{eme}. jours après que le grain ait été placé sur le support. Celui-ci était constitué ; soit de feuilles de papier buvard imprégnées d'une solution de mannitol ; soit de deux plaques d'argile séparées par une feuille de cellophane. Les racines se développaient librement dans le sens vertical au contact du support.

Courbe M :

L'action dépressive de la pression osmotique des solutions de mannitol est bien connue. Au delà de 10 atmosphères, la mauvaise solubilité du mannitol entraîne une erreur dont on a cherché à tenir compte par des mesures de cryoscopie, mais qui n'est pas complètement contrôlée.

Courbes A1 et A2

Les valeurs portées en ordonnées sont celles de la croissance sur plaque d'argile à diverses humidités. En abscisses on a porté ; pour la *courbe* A_2, la force de succion correspondante obtenue à partir d'un étalonnage établi par Hallaire sur membrane poreuse ; pour la *courbe* A_1, la somme de la force de succion et de la pression osmotique des solutions du sol obtenue par cryoscopie. La variabilité des résultats est matérialisée par la longueur des traits horizontaux.

Nous ne pouvons préjuger de l'influence de la pression osmotique des solutions du sol, ne connaissant pas la nature des sels dissous ; il est vraissemblable que la courbe d'action combinée de la force de succion et de la pression osmotique se situe entre A_1 et A_2 et qu'elle présente un point d'inflexion comme ces deux courbes. Le sens de ce point d'inflexion reste à préciser.

Les croissances des racines secondaires et du coléoptile suivent la même loi que celle de la racine primaire, mais avec retard. Le coléoptile, par exemple, ne croît rapidement que quand la racine primaire a atteint 30 à 60 mm de longueur (fig. 3).

D'après SLATYER l'élongation des cellules vacuolées cesse au début plasmolyse, c'est-à-dire quand le potentiel de l'eau extérieure est égal au potentiel osmotique du

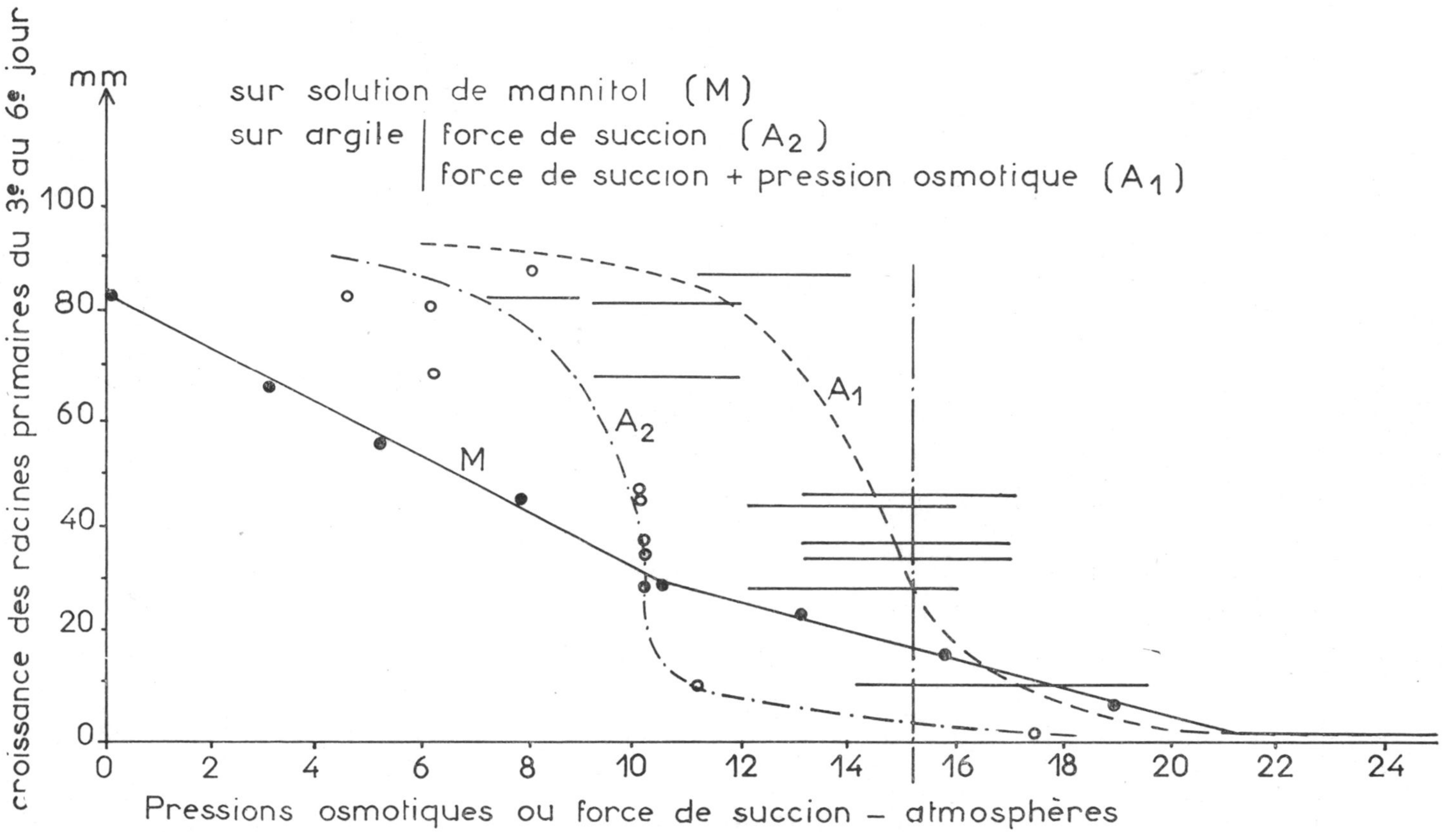


FIG. 3. — *Croissance de la racine primaire (à 21° du 3ème au 6ème jour).*

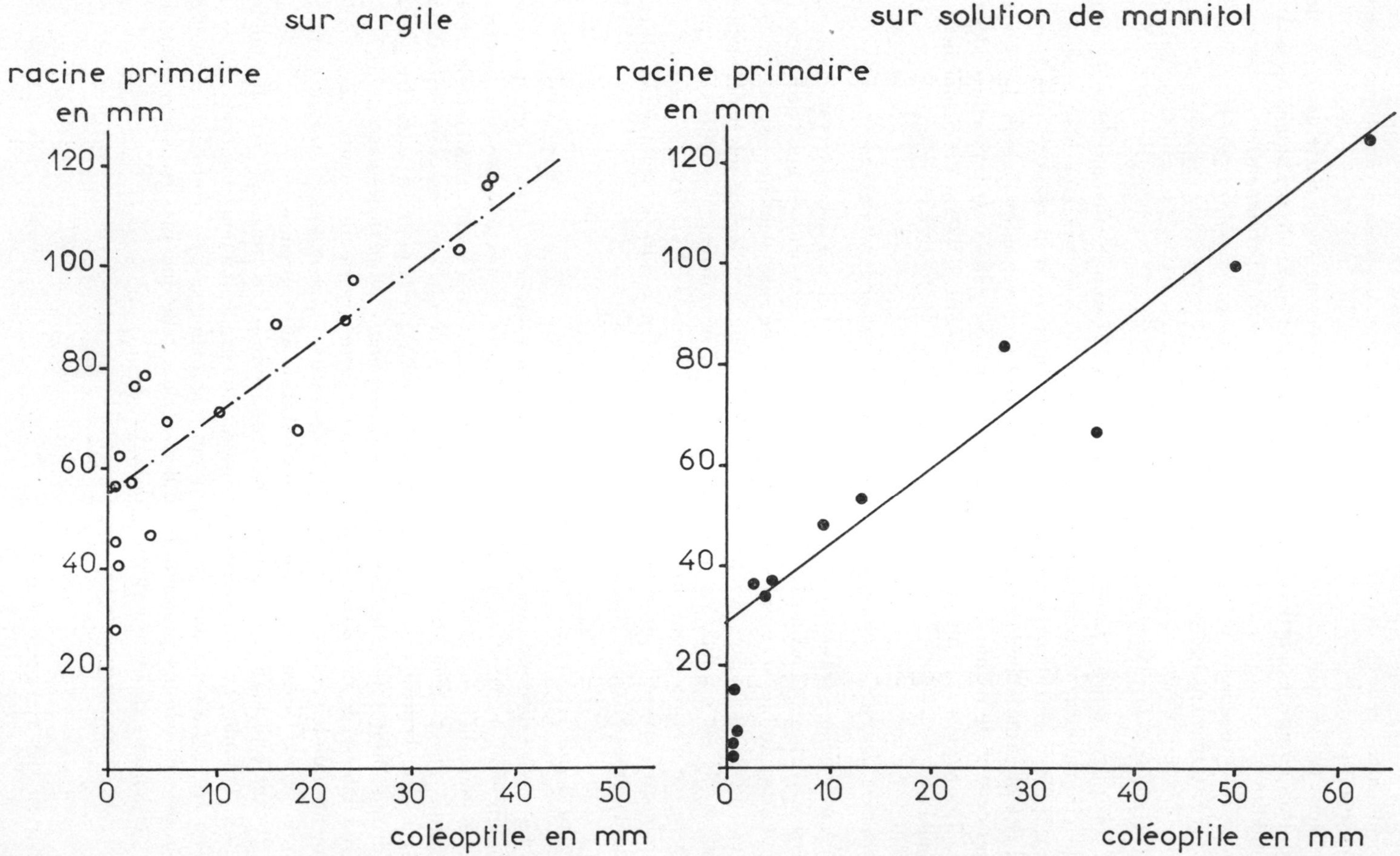


FIG. 4. — *Croissance comparée de la racine primaire et du coléoptile (en 6 à 8 jours).*

suc cellulaire ; celui-ci devait donc correspondre à une pression osmotique voisine de 15 atmosphères.

Nous retiendrons ici que la vitesse de croissance sur argile varie peu pour des humidités comprises entre 34 p. 100 et 23 p. 100 et s'annule pratiquement quand l'humidité passe de 22 à 21 p. 100 (point de flétrissement permanent).

Le ralentissement, ou même l'arrêt de la croissance, en sol sec peut-être illustré par les observations écologiques suivantes.

Cas du pot de fleur (Tunis 1947).

Les pluies d'hiver ramènent à la capacité au champ le premier horizon de sol d'une cinquantaine de centimètre d'épaisseur. Le sous-sol, préalablement amené au point de flétrissement permanent par une culture de 1946, reste sec sur 75 cm d'épaisseur. Le blé talle abondamment, ses feuilles sont nombreuses et longues. Quand les pluies cessent de réhumidifier la couche de la surface, celle-ci est rapidement desséchée. Les racines n'ayant pu traverser l'horizon suivant, le blé meurt rapidement à l'épiage.

Destruction des emblavures par une pluviométrie d'automne insuffisante.

Après jachère travaillée, le sol est desséché sur quelques décimètres d'épaisseur. Il arrive parfois, qu'à l'automne, une pluie d'orage de quelques mm. provoque la germination du blé, surtout dans les creux où l'eau de ruissellement s'est accumulée. En ces points, la liaison de l'humidité étant rétablie avec le sous-sol, le développement du blé est normal. Mais, sur les plages qui se trouvent à quelques cm. plus haut, le blé n'a pas germé ou bien voit sa croissance s'arrêter. Dans ce dernier cas le grain est souvent la proie des moisissures et on doit refaire les emblavures (Bœuf le blé de Tunisie).

Effet du labour profond.

La vitesse de croissance à 21° était dans notre essai de l'ordre de 2 cm. par jour, la progression du front de racines dans un sol aéré de texture moyenne pourrait mettre journellement à la disposition du feuillage, dans le cas d'un couvert végétal fermé, une tranche d'eau de l'ordre de 2 mm, ce qui confirme les observations d'Hallaire. Dans le cas d'un couvert végétal ouvert, elle pourrait atteindre 4 mm, quantité suffisante pour les besoins des plantes dans le plupart des cas.

La vitesse de croissance des racines peut être supérieure à cette valeur ; elle augmente rapidement en fonction de la température. q_1 peut donc, dans une certaine mesure, suivre l'augmentation de la transpiration au printemps.

Il faut cependant considérer les cas où la vitesse de croissance est plus faible. En sol humide l'aération devient normalement le facteur limitant (Russel et Gingrich). La compacité du sol joue un rôle analogue. Ceci peut expliquer l'effet favorable des labours profonds en années sèches, telle que 1955 dans nos essais de Souk-el-Khemis en Tunisie (ferme Gounot).

Rendement en q/ha

	1951	1955
Travail superficiel de la jachère	26,8	20,3
Avec labour profond à 0,40 m	28,0	27,5

Développement du blé après jachère travaillée sur une seule pluie (Ousseltia Centre Tunisien, 1947).

Notons d'autre part que l'humidité du sol permet non seulement la croissance, mais aussi la ramification des racines et, chez les graminées, le tallage.

On observe en effet que le tallage ne se produit pas en absence de pluie réhumidifiant l'horizon superficiel du sol.

Ceci peut être illustré par l'observation écologique suivante.

Une pluie fait germer le blé en automne et rétablit la liaison de l'humidité avec le sous-sol qui n'est cependant pas à la capacité au champ. Aucune pluie n'interviendra par la suite jusqu'à la maturation.

Le pied de blé développe ses racines séminales qui contribueront seules à son alimentation pendant toute la vie de la plante, car les racines de tallage ne se développent pas.

Le pied ne donne qu'une tige, le maître brin. L'épi n'a que quelques épillets et ne donne en moyenne qu'un grain parfaitement constitué et non échaudé.

CONCLUSION

Dans cet exposé, qui nous a permis de rendre compte de quelques observations personnelles, nous avons insisté surtout sur l'importance du front de dessèchement qui se confond avec le front radiculaire en période sèche. Mais nous n'avons fait que poser des problèmes. En écologie, toute recherche d'ordre physio-chimique entraîne des études d'ordre biologique. La plante réagit à l'action des facteurs du milieu, et il est utile de connaitre les lois générales de sa réaction. Mais aussi, dans une certaine mesure, elle peut s'adapter aux conditions actuelles ; en particulier, dans le cas qui nous préoccupe ici, les espèces d'origine méditerranéennes sont adaptées à la sécheresse estivale. Les annuelles, à condition de ne pas être « induites en erreur » par une succession de temps anormaux, finissent leur cycle de développement sans pluie. Les vivaces exploitent prudemment et progressivement les réserves profondes du sol. Il serait donc nécessaire de faire des cas d'espèces.

Reçu pour publication en novembre 1960.

RÉSUMÉ

En période sèche, l'alimentation en eau des végétaux est conditionnée par l'humidité du volume de terre occupé par les racines, mais aussi par la progression du front radiculaire. Celle-ci fournit à la plante une quantité d'eau fonction de la surface du front radiculaire et de la vitesse de croissance des racines. Dans les plantations à grand écartement la surface du front radiculaire est de forme sphérique et sa progression peut fournir au végétal des quantités d'eau suffisantes pour subvenir à ses besoins dans la plupart des cas. Dans les plantations serrées, la surface du front radiculaire est plane et réduite. La vitesse de croissance des racines dépend d'un certain nombre de facteurs dont l'humidité et l'aération du sol, ceci permet d'expliquer quelques observations écologiques, en particulier l'action des labours profonds.

Des résultats partiels sont fournies par l'absorption de l'eau par préférence au voisinage de la surface dans un sol de luzernière et sur la vitesse de croissance de la racine primaire de plantule de blé.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

(1) BROUWER R. 1954. The regulating influence of transpiration and suction tension on the water and salt uptake by roots of intact *vicia faba* plants *Acta Bot. Neerl.* **3**, 264, 312.
Cité dans F. C. Stewart-*Plant Physiol.* Vol II, p. 162.

(2) GINGRICH J. R. and RUSSEL M. B. 1957. A comparaison of effects of Soil Moisture Tension and osmotic stress on root growth. *Soil Sci.* **84**, p. 185, p. 194.

(3) SLATYER R. O. 1960. Absorption of water by plants *Bot. Rev.*, Vol. 26, **3**, p. 331-392.

Le Directeur-Gérant : M. L. CAGNAC.

Imprimerie BUSSIÈRE à Saint-Amand (Cher), France. — 25-8-1961

Dépôt légal : 3e trimestre 1961. N° d'impression : 881

Ann. agron., 1961, **12** (2), 169-206.

631.414.3

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE ET DES BASES ÉCHANGEABLES DES SOLS NON CALCAIRES

I. — Capacité d'échange. discussion et choix des méthodes.

P. LEFEVRE
Station d'Agronomie, Amiens.

SOMMAIRE

La première partie de l'étude consacrée à la capacité d'échange et aux bases échangeables des « sols non calcaires » (CO_3Ca < 10 p. 100) a porté sur le choix d'une méthode.

Pour cela ont été comparés divers modes opératoires appartenant aux deux groupes de procédés auxquels ils se rattachent :

— Déplacement des bases échangeables, de l'hydrogène échangeable et addition de ces quantités.

— Saturation du sol par un cation déterminé puis déplacement et dosage de la quantité adsorbée de ce cation.

Les valeurs des capacités d'échange déterminées par les diverses méthodes étudiées sont, dans l'ensemble, du même ordre de grandeur.

Après examen de la valeur des critiques et en procédant aux essais nécessaires sur huit points particuliers, la méthode à l'acétate d'ammonium a été adoptée comme technique de détermination de la capacité d'échange des sols. Le réactif utilisé pour la saturation du sol en ammonium sert en même temps à l'extraction des bases échangeables.

Appendice : Mode opératoire utilisé.

INTRODUCTION

La connaissance de la valeur de la Capacité d'Echange des sols a permis à Chaminade (1936) de montrer que, dans divers types de sols français, la « rétrogradation », c'est-à-dire la fixation sous une forme difficilement échangeable, du potassium apporté par les engrais, avait lieu pour une valeur de potasse échangeable inférieure à 4 p. 100 de celle de la capacité d'échange.

Dans un travail plus récent, G. Barbier, Tendille et Trocmé (1957) écrivent « il apparaît plus sage de maintenir à leur niveau actuel les sols de richesse moyenne ». L'année suivante, en 1958, Strasman, Quidet et Blanchet indiquent que « la détermination du rapport K/Ca constitue un test beaucoup plus représentatif du pouvoir alimentaire du sol à l'égard de la plante que le seul dosage de K échangeable ».

D'autre part, on sait qu'il existe, entre les cations échangeables, certains antagonismes à l'égard de la plante, antagonismes dont l'action est variable suivant les cas.

Pour améliorer l'appréciation des chiffres analytiques et pour faire le point sur l'état des sols de la région, nous avons donc voulu voir :

— les valeurs de la capacité d'échange des types de sols les plus répandus.

— les valeurs des bases échangeables.

— les rapports de ces bases entre elles et à la capacité d'échange.

Avant d'exposer les résultats auxquels nous sommes parvenus, nous devons indiquer que capacité d'échange et bases échangeables ont fait l'objet de très nombreux travaux, surtout à l'étranger.

Diverses méthodes analytiques ont été proposées pour leur détermination.

C'est pourquoi il nous a semblé nécessaire de justifier le mode opératoire adopté : ce sera l'objet de la première partie.

Une deuxième sera consacrée à la discussion des résultats obtenus.

L'ensemble de cette première étude a été limité aux « sols non calcaires », nous entendons par là ceux ayant moins de 10 pour mille de carbonate de calcium dans la terre fine.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES SUR LES MÉTHODES DE DOSAGE

L'étude entreprise, ainsi qu'il vient de l'être indiqué, implique la détermination de 2 groupes de valeurs :

— la capacité d'échange.

— les principaux cations échangeables, c'est-à-dire, calcium, magnésium, potassium, sodium.

Si la détermination des cations (métalliques) échangeables, séparément ou en bloc est relativement facile et peu discutée (extraction par l'acétate, le chlorure d'ammonium ou l'acide chlorhydrique dilué, et dosage par les techniques classiques), il n'en est pas de même pour la capacité d'échange.

Celle-ci, du fait de la présence de l'hydrogène échangeable, qui passe pour difficilement déplaçable, a donné lieu à la mise au point de nombreuses méthodes.

Parmi celles-ci, les plus employées dérivent de deux principes de base, ce qui permet de les classer en deux groupes :

1 — Dosage des bases échangeables (ou cations métalliques échangeables), de l'hydrogène échangeable et addition de ces quantités.

2 — Saturation du sol par un cation généralement choisi parmi ceux n'existant qu'en quantités minimes dans le sol, puis déplacement et dosage de ce cation fixé.

Afin d'éviter une énumération fastidieuse, nous avons résumé ces deux groupes de méthodes dans les tableaux 1 et 2, sans avoir cependant la prétention d'indiquer tous les procédés utilisés.

Ces méthodes ont donné lieu, de la part de divers auteurs, à de nombreuses études comparatives et fréquemment conduit à des résultats plus ou moins contradictoires.

On se trouve alors fort embarassé dans le choix d'un mode opératoire, étant donné que les variations enregistrées proviennent souvent de la constitution même du sol.

TABLEAU I

1er groupe — Méthodes de détermination de la C.E. par la Somme de Bases Echangeables + Hydrogène Echangeable

Déplacement des B. E.	Dosage de H	Auteur
Électrodialyse		*in* Piper (1950).
Au moyen d'Acide :		
HCl 0,01 *n*	Méthode MEHLICH.	Van HOVE (1956).
S. B. E. globale ou par addition des B. E.	Diminution du pH de l'Ac.Ba titrage par HCl 0,1 *n*.	
HCl 0,01 *n*	Diminution du titre d'Ac.Ca, titrage par NaOH 0,1 *n*, analogie avec RIEHM et SCHATSCHABEL.	LIVENS (1954).
Titrage global S. B. E. par diminution d'acidité (analogie avec KAPPEN et HUDIG).		
HCl 0,04 *n*		GEDROIZ (1918) *in* Piper.
HCl *n*/20		HISSINK (1934).
HCl *n*/20	Doses croissantes de $Ca(OH)_2$, détermination de l'excès et détermination graphique de T-S.	JORET et MALTERRE (1934).
Acide acétique 0,5 *n*		WILLIAMS (1928).
	Métanitrophénol dans eau de chaux (tampon).	PIPER (1950).
	Base tamponnée. Titrage avant-après.	SCHOFIELD (1933) *in* Piper.
Au moyen des Chlorures :		
NH_4Cl		KELLEY *in* Hissink (1928).
NH_4Cl pour Mg. K. Na.— NaCl pour Ca.	Par calcul après détermination de T.	HISSINK (1923).
1 000 NaCl*n* + 1 000 NaCl*n*	$Ba(OH)_2$ par doses croissantes.	HISSINK (1923).
Cl_2Ba → totalité des B. E.		PARKER (1929).
Cl_2Ba tamponné	Diminution du pH du Cl_2Ba pH 8,2. Titrage par HCl 0,04 *n*.	MEHLICH (1948).
Au moyen d'un Acétate :		
Acétate d'Am → totalité des B. E.		BRAY et WILHITE (1929).
Acétates divers	Titrage du percolat par base *n*/10.	GOLDEN (1942).
	Sol + Ac. Ba. Distillation acide acétique jusqu'à suspension du sol = pH 7,0.	BARSHAD (1954).
Acétates	Ac. Ca pH 7,0 0,5 *n*. Titrage diminution d'alcalinité :	BARROWS (1958), SHAW (1949), A. O.
	— par $Ba(OH)_2$ jusqu'à pH 8,8. Digestion sol dans Ac. Ca 0,5 M pH 7,0 ;	A. O. A. C. (1955).
	— diminution du titre dosé par $Ba(OH)_2$ jusqu'à pH 8,8.	A. O. A. C. (1955).
Acétate d'Am *n* ou 0,1 *n* pH 7,0	Diminution d'alcalinité par NaOH 0,05 *n* jusqu'à pH 7,0.	MEHLICH (1945).
E. D. T. A.		ITO (1955).
	Titrage du sol par $Ba(OH)_2$ jusqu'à pH 7,0.	PARKER (1929), *in* Piper.
	Excès connu $Ca(OH)_2$ sur sol, carbonatation du non fixé par sol. la différence donne H.	BRADFIELD-ALLISON (1933) *in* Piper.
Acétate Ba pH 7,0	Titrage du filtrat par $Ba(OH)_2$ *n*/10.	PARKER (1929) *in* Brunel.
	$Ca(OH)_2$ en présence d'Ac. Ca.	SHAW (1949).
	$Ba(OH)_2$ » » d'Ac. Ba.	

TABLEAU 2

2e groupe — Méthodes de mesure de la Capacité d'Échange opérant par saturation du sol.

Remarques	Méthode de Saturation	Élimination de l'Excès	Déplacement du cation	Dosage	Auteurs
			Saturation par une Base		
	$Ba(OH)_2$		SO_4Mg titré	De l'excès Mg par EDTA	CECCONI-POLESELLO (1956)
	$Ba(OH)_2$		NH_4Cl		PIERRE et SCARSETH (1931)
Sur terre désaturée à HCl.	$Ba(OH)_2$ par doses croissantes			Titrage de l'excès et détermination graphique	HISSINK (1934)
	» »	Centrifugation de suspension		Titrage de l'excès et détermination graphique	MOREL (1957)
	» »				*in* GOLDEN (1942)
	» »			Titrage	PURI (1934) *in* PURI (1935)
	NH_4OH	Évaporation à 40°C	MgO ou tampon phosphate		MEHLICH (1948)
Sur terre désaturée à HCl (modification de HISSINK	$Ca(OH)_2$ par doses croissantes			De l'excès $Ca(OH)_2$ et détermination graphique	JORET-MALTERRE (1934)
			Saturation par un Acide		
	HCl $n/20$	Eau	Baryte par doses croissantes	Titrage de l'excès	HISSINK (*in* BRUNEL) (1948)
Contact une nuit dans 100 cc puis lessivage par 150 à 500 du réactif pour tous les GOLDEN (1942)	HCl $n/20$				GOLDEN (1942)
	HCl 0,001 n	Alcool méthylique 99 %		Tit. 100 cc suspension argile 1 % par NaOH	BOWER et TRUOG (1940)
	CH_3CO_2H $n/2$				GOLDEN (1942)
			Saturation par un Sel neutre d'acide minéral fort		
	KCl n pH 7,0		Ac. Am. $MgCl_2$, Cl_2Ca, Cl_2Ba, NaCl		BARSHAD (1951)
	KCl n		$CO_3(NH_4)_2$ n	Titrage d'un résidu alcalin	PURI (1933)
Pré-traitement 100 KOH 0,1 n— 24 heures d'agitation	KCl n		$CO_3(NH_4)_2$ n	Titrage d'un résidu alcalin	PURI (1933)
Pré-traitement par $CO_3(NH_4)_2$ n 500 cc 0,2 n	KCl 0,2 n 5 fois 100 cc		$CO_3(NH_4)_2$ 0,2 n Ac. Am.		PURI (1935)
Titrage percolat KCl par base $n/10$ donnant H échangeable	KCl	Alcool 95°			GOLDEN (1942)
	NH_4Cl	Eau distillée jusqu'à absence de chlorures	Dist. en présence NaOH	Correction de la M. O. du sol	KELLEY *in* HISSINK (1928)
Pré-traitement par $Ba(OH)_2$	NH_4Cl	Alcool jusqu'à absence de chlorures	Dist. en présence MgO		PARKER *in* PURI (1939)

	NH_4Cl *n*	Alcool absolu	KCl *n* 200-500 cc		GOLDEN (1942)
	NH_4Cl bouillant				SHAW et Mc. INTIRE (1935)
Pré-traitement 500 Ac. Na 0,5 *n* pH 8,2	NH_4Cl 250 cc 0,5 *n* pH 5,5	250 *cc* alcool 80 %	250 *cc* NaCl 0,5 *n*		VAN DER MAREL (1950)
	NaCl		$Ba(OH)_2$		PURI (1935)
Pré-traitement par $CO_3(NH_4)$ 0,2 *n*	NaCl 5 fois 100 cc		$CO_3(NH_4)_2$		PURI (1935)
Meilleur échange de H que par Am. Passe moins de Ba pendant lavage, que d'Am. dans NH_4Cl (HISSINK 1928)	$BaCl_2$	Eau distillée		Dosage Ba	BOBKO-ASKINASI *in* HISSINK (1928)
	$BaCl_2$				GEDROIZ *in* PIPER (1950)
	$BaCl_2$	H_2O ou alcool 80 %	KCl *n* 200/500 cc		GOLDEN (1942)
	$CaCl_2$	H_2O	NH_4Cl	Précipitation C_2O_4Ca dans percolat NH_4Cl	BASTISSE (1947)
	$MgCl_2$		KCl *n* 200/500 cc		GOLDEN (1942)
	$MgCl_2$	Centrifugation H_2O	NaCl	Précipitation PO_4AmMg colorimétrie P	MOREL (1957)
	$MnCl_2$	Alcool 95°	KCl		GOLDEN (1942)
	$MnCl_2$	Centrifugation alcool	KCl	Polarographie	HOLTZINGER (1954)
	$MnCl_2$ *n* pH 6,8	Alc. méthylique 99 %	Ac. Am.	Colorimétrie MnO_4	BOWER et TRUOG (1940)
	$FeCl_3$ 0,01 *n* pH 2,7 eau ou alcool	Alc. méthylique 99 %	Ac. Am.	Gravimétrie de Fe_2O_3	BOWER et TRUOG (1949)
	$LaCl_3$ 0,1 *n* pH 6,5 eau ou alcool	Alc. méthylique 99 %	Ac. Am.	Gravimétrie de La_2O_3	BOWER et TRUOG (1940)
	$ThCl_4$ 0,1 *n* pH 2,9 eau ou alcool	Alc. méthylique 99 %	Ac. Am.	Précipitation oxalate pesé en ThO_2	BOWER et TRUOG (1940)
	NO_3H puis Ac. Ag puis NO_3Ag	Alc. éthylique 95 %	Thiourée	Titrage excès thiourée par ampérométrie	HOLT (1956)
	$(NO_3)_2Be$ 0,1 *n* pH 4,0 dans eau ou alcool	Alc. méthylique		Gravimétrie BeO	BOWER et TRUOG (1940)
			Saturation par un Sel neutre tamponné		
	Cl_2Ba tamp. triethanolamine pH 8,2 + Cl_2Ba	Eau distillée	Cl_2Ca	CrO_4Ba et colorimétrie	MEHLICH (1948)
Pré-traitement par HCl 500 cc, 1 *n* (élimination Ca)	Idem	Eau distillée	Cl_2Ca	CrO_4Ba et colorimétrie	PRATT (1954) (modification de MEHLICH)
	Borate de Na ou K tamponné pH 9,6 1 m. e. pour 100 cc				KICK (1954)
			Saturation par un Sel hydrolysé		
	Ac. Am. pH 7,0				SCHOLLENBERGER ET DREIBEIBIS (1930)
	Ac. Am.	Alcool 95 %	NaOH 14 *n*		BARROWS et DROSDOFF (1958)

TABLEAU 2 *(suite)*

Remarques	Méthode de Saturation	Déplacement du cation	Déplacement du cation	Dosage	Auteurs
	Ac. Am.	Acool 95 %	NaCl 10 % + HCl 1 %	Déplacement NaOH 14 *n* dosage d'Am	BARROWS et DROSDOFF (1958)
	Ac. Am.	Alcool absolu	KCl *n*		GOLDEN (1942)
	Ac. Am. *n* ou 0,1 *n* pH 7	Alcool	Dist. avec MgO	Am	MEHLICH (1945)
	Ac. Am. *n* 300 cc pH 7	Alc. 80 % avec 1 ml/L NH_4OH *n*	» »	Am	METSON (1956)
	Ac. Am.		» »	Am	PERKINS (1952)
	Ac. Am.	Alcool 95 %	NaCl 10 % acidifié	Am	PRATT (1954)
	Ac. Am.	Alcool à réaction alcaline	Dist. avec NaOH *n*	Am	A. O. A. C. (1955)
	Ac. Am. *n* pH 7,0				ALLISSON (1953)
Si sol acide : pré-traitement par 100 cc $Ba(OH)_2$	Ac. Am. *n* digestion à 70°C puis lessivage	Alcool méthylique	Addition de 5 % CO_3Na_2 et aération	Am	KELLEY *in* PURI (1939)
	Idem. 15 heures de contact au lieu de 8 heures	Alcool méthylique	Addition de 5 % CO_3Na_2 et aération		CHAPMAN et KELLEY (1930) et *in* PURI (1939)
Par centrifugation	Ac. Am.	Alcool méthylique 99 %	Ac. K *n*	Distillation d'Am	BOWER et TRUOG (1940)
	Ac. Am.	Eau puis alcool	Récupération des lavages	d'Am excédentaire	AMAVIS (1959)
	Ac. Am.		SO_4H_2 puis déplacement d'Am par NaOH		BARSHAD (1951)
	Ac. Am.		Avec $Ba(OH)_2$, $Ca(OH)_2$, MgO, KOH, NaOH		BARSHAD (1951)
Double détermination par Am puis par Ba	Ac. Am. *n*/5 pH 7,0	Ac. Am. *n*/100 (détermination du volume humectant le sol)	Cl_2Ba *n*/5 pH 7,0	Titrage volumétrique de l'Am en présence de formol.	KICK (1951)
	Lessivage précédent par Cl_2Ba	Ac. Ba *n*/100 pH 7,0 (détermination du volume humectant le sol)	HCl *n*/20	Précipitation du Ba par 10 cc $Cr_2O_7K_2$ *n*/5 et détermination de l'excès $Cr_2O_7K_2$	KICK (1951)
	Ac. Baryum	Eau ou alcool 80 %	KCl *n*		GOLDEN (1942)
	» » 0,2 *n*	Eau	HCl 0,05 *n*	Précipitation SO_4Ba	MEHLICH (1948)
	» »	Eau	HCl	Photométrie de Ba	TOTH *in* PRATT (1954)
	» »		NH_4Cl		PIERRE et SCARSETH (1931)
Pré-traitement HCl 50 cc 0,1 *n* (élimination Ca interférant)	» »	Eau	Ac. Am. percolat reçu dans LiCl	Photométrie de Ba	PRATT (1954)
	» » *n* pH 7,0	Alcool méthylique	Ac. Am.	Gravimétrie SO_4Ba	BOWER et TRUOG (1940)
Après lessivage Ac. Am. donnant les B. E.	Ac. Ca 80 cc 0,5 *n*	Alc. 70 %, 2 fois 40 cc	Ac. Am.	Photométrie Ca	BARROWS et DROSDOFF (1958)
	» »	Eau ou alcool 80 %	Excès versénate titré	Titrage excès EDTA	PERKINS (1952)
	» » *n* pH 7,0	Méthanol centrifugation	Ac. Am.	Volumétrie C_2O_4Ca	BOWER et TRUOG (1940)

	Ac. Ca. *n*	Échange du ^{40}Ca fixé par le sol, par du ^{45}Ca, du $(NO_3)_2Ca$		Dosage ^{45}Ca, ^{40}Ca	BLUME et SMITH (1954)
	« » *n* neutre (+ Cl2Ca à la fin)	Alcool éthylique	Ac. Am. ou Ac. Na	Photométrie	SAWHNEY, JACKSON et COREY (1959)
Emploi en sols calcaires	Ac. Na	Alcool 95° centrifugation	Ac. Am.	Na	BOWER, REITERMEIER, FIREMAN (1952)
	» »	Alcool 80 % à 1 ml/l Na Ac. *n*	Ac. Am. pH 7,0	Photométrie Na	METSON (1956) modification de BOWER (1952)
	» » 1 *n* pH 7,0	Alcool méthylique	Ac. Am.	Gravimétrie acétate triple	BOWER et TRUOG (1940)
	Ac. K	Alcool 95 %	Ac. Am.	Photométrie de K	SWINDALE et FIELDES (1952)
	» »	Alcool 95 %	Ac. Am.		GOLDEN (1942)
	» »	Alcool méthylique 99 %	Ac. Am.	Volumétrie du cobaltinitrite	BOWER et TRUOG (1940)
	» » *n* neutre (+ KCl à la fin)	Alcool éthylique	Ac. Am. ou Ac. Na		SAWHNEY, JACKSON et COREY (1959)
	Ac. Mg		KCl *n*		GOLDEN (1942)
	» » *n* pH 7,0	Alcool méthylique 99 %	Ac. Am.	Gravimétrie $P_2O_7Mg_2$	BOWER et TRUOG (1940)
	Ac. Mn	Alcool 95 %	KCl *n*		GOLDEN (1942)
	Ac. Cu				CORNFIELD (1952)
	» Cu ++ 0,5 *n* pH 5,5	Alcool méthylique		Iodométrie	BOWER et TRUOG (1940)
	» » *n*/5				GOLDEN (1942)
	» » *n*/5 + acide acétique	Agitation-filtration		du Cu excédentaire, colorimétrie par NH_4OH	SIELING (1941)
	Ac. Sr *n* pH 7,0	Alcool méthylique	Ac. Am.	Précipitation C_2O_4Sr pesé en CO_3Sr	BOWER et TRUOG (1940)
	Ac. Zn 0,5 *n* pH 6,3			Gravimétrie P_2O_7Zn	BOWER et TRUOG (1940)
	Formiate d'Am	Alcool absolu	KCl	Distillation d'Am.	GOLDEN (1942)
	Formiate de Ba	Eau ou alcool 80 %	KCl		GOLDEN (1942)

Saturation par des Corps organiques ou complexes

	Chlorure de Monométhylamine, etc		NaOH appareil PARNAS-WAGNER		MOREL (1957)
	Chlorure de cobaltihexamine		NaOH		MOREL (1957)
	» »	Eau puis alcool	Récupération des lavages	Am en excès dans lavage ou colorimétrie de $CO(NH_3)_6$	AMAVIS (1959)

Saturation par des Ions marqués

(Échange isotopique)	Césium 137 (agitation) eau puis alcool, centrifugation, récupération des lavages. Radioactivité spécifique.	AMAVIS (1959)
	(colonnes) fractions de 100 cc jusqu'à ce que l'activité spécifique de la solution effluente soit égale à celle de la solution influente.	AMAVIS (1959)
	Strontium 90 (identiques au Césium 137).	AMAVIS (1959)
	Calcium 45 (échangé du sol Ca par acétate, avec $(NO_3)_2Ca$). Dosage de ^{40}Ca et ^{45}Ca.	BLUME et SMITH (1954)

TABLEAU 3

Résultats du dosage de l'hydrogène échangeable
en m.e. pour 100g.

Méthode LIVENS

Origine : Oissy (Somme)

Numéros	5 007	5 006	5 019	5 345	5 023	5 025
pH du sol	6,3	6,5	6,5	6,5	6,7	7,4
H	1,0	0,9	1,2	1,0	1,2	0,5
	1,2	1,1	1,3	1,0	1,6	0,6
	1,5	1,4	1,7	1,5	1,7	0,9
	1,5	1,5	1,7	1,5	1,8	1,0
	1,7	1,6	1,8	1,7		1,0
	1,9	1,6				1,1

Origines : Dombes (Ain)

Numéros	1	2	4	14	15 bis	13	15	6
pH du sol	5,1	5,4	5,4	5,5	5,5	5,8	5,8	6,6
H	2,0	1,4	1,6	2,8	1,3	1,4	0,2	1,9

Méthode MEHLICH

Numéros	5348 B (sous-sol)	5346	5014 A
pH du sol	6,45	7,0	7,85
H	1,3 – 1,4 – 1,6	0,4 – 0,7 – 0,7	0,1 – 0,2 – 0,3

Méthode BARSHAD

	Numéros	pH initial	1re distillation	2e distillation	3e distillation	4e distillation
	5 007	6,35				
H en m. e.			0,1	1,1		
pH obtenu			6,7	6,1 (?)		
	5 346	7,0				
H en m. e.			2,3	2,2	1,5	1,8
pH obtenu			6,9	7,0		

Méthode VAN DER MAREL

Terre Oresmaux n^e^ 5589. (Somme)
Titrage de l'acétate de sodium pH 8,2 par la soude pour revenir à pH 8,2 ;
Valeur de l'H échangeable : 1,2 ; 1,3 ; 1,4 ; 4 fois 1,5 ; 1,7.
Titrage de l'acétate de calcium pH 8,2 par Ca $(OH)_2$ pour revenir à pH 8,2.
Valeur de l'H échangeable : 1,6 ; 1,8 ; 1,9 ; 2,0 ; 2,0 ; 2,3 ; 2 fois 2,5.

La méthode utilisant l'acétate d'ammonium, prise souvent comme référence, a été aussi l'objet de nombreuses objections.

Il était donc nécessaire de procéder à des essais préliminaires afin de fixer son choix sur une technique déterminée en connaissance de sa valeur.

ESSAIS PRÉLIMINAIRES.

Pour le premier groupe de méthodes, la technique de déplacement des bases échangeables étant admise sans discussion par un des procédés cités plus haut, nos essais ont porté sur le déplacement et le dosage de l'hydrogène échangeable.

Pour le deuxième groupe, les essais ont eu trait aux points suivants :

A : Saturation du sol par un sel neutre d'acide fort.
Saturation du sol par différentes cations liés au radical acétate.
Comparaison de diverses méthodes récentes.

B : Emploi de l'acétate d'ammonium.
Examen des principales objections.

1er Groupe de méthodes — Essai de dosage de l'hydrogène échangeable.

Lors de nos premiers essais, la technique Livens (1954) nous imposait la détermination de la quantité d'hydrogène échangeable pour l'ajouter à la somme des bases échangeables, afin d'obtenir la valeur de la capacité d'échange.

L'hydrogène échangeable a également été dosé par les méthodes Mehlich (1948) Barshad (1954) Van der Marel (1950).

L'ensemble de ces résultats (tableau 3), qui n'avait rien de convaincant, nous a amenés à abandonner le dosage de l'hydrogène échangeable.

2e Groupe de méthodes — (partie A : essais divers)

1 — *Saturation du sol par un sel neutre d'acide fort.*

Certains auteurs saturent le sol par KCl, NaCl ou NH_4Cl.

Quoique les constituants, en particulier de ce dernier sel, soient presque aussi faciles à éliminer que ceux de l'acétate d'ammonium, ce lessivage par les sels neutres est critiquable selon Puri et Uppal (1939).

Ces auteurs indiquent en effet qu'une telle solution, n'étant pas tamponnée, prend immédiatement le pH du sol et laisse ce dernier sensiblement au même état de saturation pourvu que la terre ne soit ni trop acide, ni trop alcaline. Les acétates, au contraire, laissent le sol à pH plus élevé.

C'est pourquoi nous avons vérifié s'il existait une différence entre les valeurs des capacités d'échange obtenues en percolant le sol par une solution de sel neutre et celles résultant de l'emploi de l'acétate d'ammonium.

Essai réalisé :

Sur trois séries de sol, nous avons fixé respectivement :

— Ba par percolation de Cl_2Ba

— K par percolation de KCl
— Am par percolation de $CH_3CO_2NH_4$ (ou Ac. Am.)
par deux techniques différentes [1].

Après élimination de l'excès de cation non absorbé, le déplacement de la base fut réalisé par :

— $(CH_3CO_2)_2Ca$ dans le cas de Ba (dosage par le CrO_4Ba)
— Ac. Am. dans le cas de K (photométrie de K)
— MgO dans le cas de Am (distillation)

TABLEAU 4

Comparaison des valeurs de la C. E. obtenues par fixation de Ba, K, Am.
en m.e. pour 100g.

Numéros	Ba	K	Am. METSON	Am/30g
4 169		0,9		0,9
5 594		2,0	3,0	
4 306	7,4	7,0	9,7	
5 589	8,8	8,6	9,6	
5 007	9,8	7,5	9,3	7,7
4 669	13,3	12,7		
4 227	13,7	13,0		
4 229	13,8	12,0	12,4	
4 541	13,9	11,3		11,3
5 006	14,1	11,6	13,8	10,6
4 294	13,6	12,5		
4 520	14,8	12,7	12,6	
4 664	14,5	13,2		
5 345 A		11,7	13,8	11,2
4 267	15,3	14,2	15,2	
4 498	15,4	13,7	14,5	
4 634	16,0	16,2		
4 539	16,0	12,7	13,3	
4 537	16,2	14,4	12,0	
4 224	16,5	13,3	13,2	
4 967	16,7	14,7	15,8	
4 639	18,1	14,2	16,0	
5 023		18,3	20,4	17,1
5 000 A	21,0	16,5	18,2	15,3
5 019		21,4	24,3	18,6
5 025		25,0	25,8	23,4
4 317	37,8	30,2	33,2	

Les résultats rassemblés dans le tableau 4 permettent de tirer les conclusions suivantes :

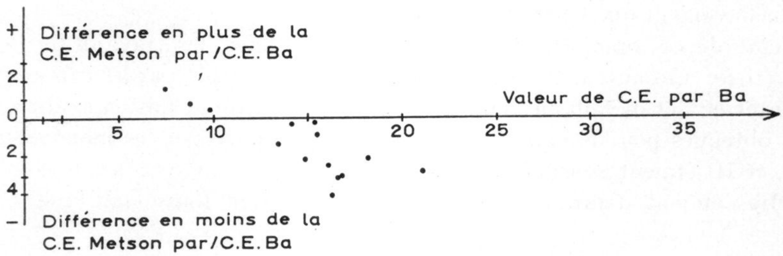
La valeur de la capacité d'échange est la plus faible, d'une manière générale et en moyenne, lorsqu'elle est déterminée par fixation de K, sur les sols étudiés.

Cette valeur est la plus forte, en moyenne, lorsque Ba est le cation fixé.

(1) technique courante :
30 g de sol percolé par 250 cc d'acétate d'ammonium N pH7 — élimination de l'excès jusqu'à absence d'ammonium dans le filtrat — vérification au Nessler. Lessivage de l'Am par KCl. Distillation.
technique METSON (1956) :
10 g de sol percolé par 250 cc d'acétate d'ammonium N pH7 — élimination de l'excès par 220 cc alcool « légèrement » ammoniacal — distillation du sol en présence de MgO.

La fixation d'Am, selon la technique METSON, fournit des résultats intermédiaires. Par contre, avec ce cation, la « technique courante » conduit à des résultats constamment inférieurs aux autres. Nous pensons que dans ce dernier cas une légère hydrolyse pourrait résulter du lavage à l'alcool à 80 p. 100, hydrolyse qui ne se produirait pas avec la quantité — limitée — d'alcool légèrement ammoniacal de METSON.

Il est intéressant de constater que la supériorité des valeurs obtenues avec le baryum ne paraît pas systématique. Ainsi, pour les capacités d'échange inférieures à 10 m.e. environ, la technique METSON donne des résultats supérieurs à ceux provenant de la fixation de Ba. Au dessus de 12-14 m.e., la différence entre les valeurs de capacité d'échange au Ba et celles de la capacité d'échange METSON semble grossièrement croître avec la valeur de la capacité d'échange (graphique 1).



GRAPHIQUE 1.

Pour une part, la valeur légèrement supérieure, obtenue en employant Ba, pourrait provenir de l'insolubilisation des humates, tandis qu'Am provoquerait des pertes légères. Ces pertes augmenteraient avec la teneur en matières organiques, laquelle croît généralement en valeur absolue, avec la capacité d'échange.

Cependant, GOLDEN, GAMMON et THOMAS (1942) indiquent que l'acétate de Baryum surestime la capacité d'échange, mais ne libère pas des quantités équivalentes de cations. MUNIER et RIVIÈRE (1946-48) constatent également que l'emploi de la baryte a tendance à augmenter légèrement la capacité d'échange des argiles.

Il faut rappeler par contre que KICK (1951), déterminant la capacité d'échange par fixation d'Am (acétate N/5) et à la suite, par fixation de Ba (chlorure N/5 puis acétate N/100) obtient dans la majorité des cas, des valeurs par Ba inférieures, dans le rapport 1/1,09, à celles fournies par l'ammonium (la solubilisation possible d'humus par l'Am n'étant pas responsable de la différence — voir p. 195).

Cela, et le fait que les acétates laissent le sol à pH plus élevé que les sels neutres, conduit à examiner l'influence du cation absorbé quand il est lié au radical acétate.

2 — *Saturation du sol par différents cations sous forme d'acétate.*

Parmi les divers acétates, celui d'Am mis à part, les plus employés ont été ceux de Na, K, Ba, Mn.

Les auteurs développent les considérations suivantes :

Acétate de Baryum. — Plusieurs chercheurs, dont BRUNEL (1948), signalent que l'acétate de baryum est particulièrement actif dans le déplacement de l'hydrogène. PRATT et HOLOWAYCHUCK, en 1954, indiquent au contraire que cet acétate est peu tamponné et ne déplace que peu d'ions H^+ dans les sols naturellement acides. Son

efficacité serait supérieure dans les argiles de types 2 : 1 (Montmorillonite, Vermiculite, Illite) à celle notée dans les argiles de type 1 : 1 (kaolinite) et les sols humifères.

L'acétate de manganèse. — Paraît très bon à GOLDEN, GAMMON et THOMAS (1942) Mn étant facile à détecter et à laver. Au cours de nos essais, cet acétate s'est montré instable en solution normale et neutre. Aussi l'avons nous abandonné.

Acétate de soude. — BOWER, REITERMEIER et FIREMAN (1952) emploient l'acétate de soude pour les sols alcalins. Cette solution présente l'avantage de solubiliser beaucoup moins de carbonate de Ca et de carbonate de Mg que l'acétate d'Am. Malheureusement le dosage des bases échangeables, en particulier, du potassium, n'est pratiquement pas possible dans le percolat initial (difficulté d'éliminer 250 m.e. Na en présence d'environ 0,3 m.e. de potassium ou interférences en photométrie).

Acétate de potasse. — Pour GOLDEN et ses collaborateurs (1942) cet acétate serait le meilleur composé à utiliser pour mesurer la capacité d'échange. Mais il présente le même inconvénient que l'acétate de soude.

A côté de ces opinions, il faut citer en particulier, les travaux de BOWER et TRUOG (1940). Ces auteurs, comparant la saturation de sols par les cations alcalins, alcalino-terreux et métalliques (Mn, Zn, Cu, Fe, La, Th) ont mis en évidence que les valeurs obtenues pour la capacité d'échange, déterminée par les monovalents (Na, K, Am, et H) étaient sensiblement identiques, tandis qu'avec les ions bivalents, les chiffres étaient d'autant plus élevés que le cation fournissait une base plus faible.

C'est ainsi que Ba et Sr, qui forment, parmi les bivalents utilisés, les bases les plus fortes, procurent des résultats à peine plus élevés que les monovalents, en particulier Am. Ceci est en accord partiel avec les observations précédemment indiquées.

BOWER et TRUOG (1940) attribuent ces valeurs plus élevées, au fait que les cations polyvalents se combinent à l'argile en plus grande quantité que les monovalents, en raison de leur aptitude à former des sels basiques d'échange, d'où explication des capacités d'échange plus élevées obtenues par saturation avec des ions polyvalents.

Il y aurait en quelque sorte une certaine analogie avec ce qui se passe lorsque l'on fixe des cations organiques de grandes dimensions (expériences de MOREL, (1957).

Pour éviter ce phénomène de formation de sels basiques d'échange, VAN DER MAREL (1950) élimine par deux traitements :

— le premier par l'acétate de sodium pH 8,2, les ions H^+

— le deuxième par le chlorure d'ammonium pH 5,5, les gels siliciques et les sesqui-hydroxydes amorphes.

Ces composés sont responsables de l'édification d'une double couche électrique qui fixe les cations provenant des acétates, en proportion d'autant plus grande que l'hydroxyde du cation est plus insoluble dans l'eau et augmente ainsi la quantité de cation déplacé par lessivage ultérieur.

On peut objecter à cette manière de procéder qu'il y a ainsi modification du complexe, et que le sol n'est plus tel qu'il se trouve dans les conditions naturelles à l'égard des cations polyvalents.

De plus, il est possible que certains minéraux argileux soient plus ou moins altérés par le traitement acide, ainsi que l'a montré MOREL, pour la vermiculite (1957).

Quoiqu'il en soit nous avons vérifié s'il y avait des différences par fixation de divers cations liés à l'acétate, en appliquant la technique de VAN DER MAREL, et une variante destinée à mettre en évidence l'influence ou non de la solubilisation de l'humus.

Essai réalisé.

Un sol de limon des plateaux, provenant de l'Amiénois, a été lessivé de la manière indiquée précédemment, puis percolé par des acétates de divers cations. On a ensuite déplacé et mesuré la capacité d'échange en dosant la quantité de ce cation adsorbé par le sol.

Mode opératoire : sur 25 g de sol.

Technique normale :

a) Lessivage par 500 cc d'acétate de soude N/2 pH 8,2.
b) Lavage par l'alcool jusqu'à absence de Na.
c) Lessivage par 500 cc NH^4Cl N/2 pH 5,5.
d) Lavage par l'alcool jusqu'à absence d'Am.
e) Percolation par un acétate alcalin ou alcalino-terreux.
f) Lavage par l'alcool jusqu'à absence du cation dans le filtrat.
g) Déplacement du cation adsorbé par l'acétate d'Am normal pH 7,0.
h) Dosage du cation considéré.

B. — *Variante pour étude de la solubilisation de l'humus* :

1. *Série à humates solubles.*

Dans la technique normale A, *c* est remplacé par l'acétate d'ammonium pH 5.5, les autres opérations étant identiques.

2. *Série à humates insolubles.*

Dans la technique courante A,
a) L'acétate de soude est remplacé par l'acétate de baryum.
b) NH_4Cl est remplacé par l'acétate de calcium.
c) NH_4Cl est remplacé par Cl_2Ca.

C. — *Dosage de l'humus.* — L'humus restant dans le sol après ces traitements a été dosé en le solubilisant par l'oxalate d'ammonium à 3 p. 100, suivant la technique CHAMINADE (1946) après que le sol eût été débarrassé par l'HCl dilué (100 cc à 2 p. 100) de l'ammonium et des autres cations qui auraient pu être retenus.

Observations en cours de travail. — Dans le cas du lessivage acétate de soude pH 8,2, acétate d'Am pH 5.5, tous les filtrats étaient pratiquement incolores (dans une autre série les filtrats d'acétate de soude étaient colorés).

— Le pH des divers acétates, après percolation (initialement 7,0, est indiqué dans le tableau 5).

TABLEAU 5

Acétate de	Na	K	Am	Mg	Ba	Ca
méthode A	6,8	7,2	6,6	6,6	6,8	6,8
méthode B_1	7,1	7,1	7,0	7,2	7,2	7,2
méthode B_2	7,2	7,2	7,0	7,2	7,2	7,2

D'autre part, le pH des acétates d'Am pH 5.5 et de Ba pH 5.5 était resté 5.5 après percolation du sol.

Les résultats reportés dans le tableau 6 donnent les indications suivantes :

Les différents acétates ont donné *par série* des valeurs de même ordre de grandeur, encore que des écarts sensibles se manifestent. Mais d'une série à l'autre, — identique — on note des écarts importants.

Il semble apparaître, cependant, qu'en effectuant un lessivage alcalin, la valeur de la capacité d'échange soit inférieure en moyenne, à celle obtenue par l'emploi exclusif de solutions d'alcalino-terreux. Ce fait se relie à l'existence d'une quantité supérieure d'humus restant extractible à la fin des traitements, dans la série aux « humates insolubles ». Cette solubilisation d'humus doit se produire, en série alcaline, surtout par les alternances de traitements acides et alcalins. En effet, dans la détermination directe de la capacité d'échange par K ou Ba (voir p. 178 et tableau 4), les valeurs de capacité d'échange sont très voisines, de même que celles de l'humus restant.

TABLEAU 6

Valeurs de la C. E. obtenues en fixant divers cations selon la technique VAN DER MAREL *et ses variantes.*

	Technique A	Technique B_1	Technique B_2	
	Acétate Na pH 8,2		Acétate Ba pH 8,2	
	NH_4Cl pH 5,5	Ac. Am. pH 5,5	Ac. Ca pH 5,5	Cl_2Ca pH 5,5
Cation fixé	en m. e. pour 100 g	en m. e. pour 100 g	en m. e. pour 100 g	en m. e. pour 100 g
Ba	4,8	8,9– 9,5–10,8	11,8–15,0	14,2–14,1
Mg	10,4	6,3– 8,7–11,3	13,4	14,7–11,4
Ca	8,5	6,6– 8,6–14,0	18,0	9,2
K	9,6	9,2–11,5–11,8–12,0	10,3–12,3–13,6	9,1– 8,3
Na	8,8	12,2–10,4–12,0–12,5	10,5–19,0–22,0	9,7– 9,5
NH_4		8,2– 9,0	7,0– 7,1	7,4
	Humus restant extractible par $C_2O_4Am_2$ à 3 % mg pour 100 g			
Cation fixé				
Ba		22,0	65,5	
Mg		23,3	58,8	
Ca		24,5		
K		19,6	53,2	
Na		22,0	37,9	
Am		46,5		

Capacité d'échange directe du sol expérimenté
Fixation de K : 8,6 Humus restant 53,4
» Ba : 8,8 » » 58,5
» Am : 9,6 (METSON)

En définitive, ce procédé a été abandonné parce que : modifiant au départ l'état du sol, nécessitant un mode opératoire long et complexe, conduisant à des résultats non fidèlement reproductibles.

Ayant ainsi examiné la question de l'hydrogène échangeable et de la saturation du sol par divers cations, nous avons ensuite comparé quelques méthodes récentes. Ce sont celles de JAWORSKY et BARBER (1959) LIVENS (1954) MEHLICH (1948) METSON (1956) et RIEHM, B. ULRICH et M. ULRICH, (1954) .

3. — *Comparaison de méthodes récentes* :

Les principes directeurs de ces méthodes sont les suivants :

Jaworsky : C'est une variante de la technique courante à l'acétate d'ammonium.

Le contact avec le sol est de 4 jours. Après élimination de l'excès, l'ammonium adsorbé par le sol est déplacé par lessivage au KCl.

Livens : Rappelons qu'il s'agit en fait d'une méthode du 1^er^ groupe.

Les bases échangeables sont déplacées par KCl N/100 (d'où S. B. E.), H par l'acétate de calcium 0.1N, et on obtient S. B. E. + H = T ou C. E.

Mehlich : Le sol est saturé en Ba par une solution de Cl_2Ba pH 8.2, tamponnée par la triéthanolamine. L'excès de Ba est éliminé par lavage à l'eau. Ba fixé est déplacé par Cl^2Ca.

Metson : L'acétate d'ammonium N pH 7.0 est employé pour saturer le sol. Am en excès est éliminé par l'alcool « légèrement » ammoniacal à 80 p. 100. On distille le sol en présence de MgO.

Riehm : Le sol est agité avec une solution d'oxalate d'ammonium. Après clarification, on détermine la baisse du titre en ammonium, diminution qui résulte de et correspond à l'Am fixé par le sol, d'où la capacité d'échange.

TABLEAU 7

Résultats obtenus par la méthode LIVENS — *Comparaison avec* METSON.
en m.e. pour 100g.

Numéros	pH	1^er^ percolation S′	2^eme^ percolation S″	S = S' + S″	H^+	T = S + H	C. E. METSON
			Sols de Limon				
5 007	6,4	9,2	0,7	9,9	1,0	10,9	9,0
		9.0	2,1	11,1	1,2	12,3	
5 345	6,5	12,4	1,3	13,7	1,0	14,7	12,6
		13,1			1,0	14,1	
5 006	6,5	12,7	0,8	13,5	1,1	14,6	13,1
		13,2	1,2	14,4	0,9	15,2	
			Sols d'Argile à Silex				
5 019	6,5	17,1	4,8	21,9	1,2	23,1	23,1
		10,0	9,4	19,7	1,3	21,0	
5 023	6,7	14,1	6,0	20,1	1,2	21,2	19,6
		8,4	4,2	12,6	0,6	13,2	
5 025	7,4	14,2	6,5	20,7	0,6	21,3	26,4
		24,4		24,4	0,5	25,9	

Les résultats reproduits dans les tableaux 7, 8, 9, autant que les observations faites en cours d'analyse, appellent les commentaires suivants :

Méthode Livens (1954) :

La méthode LIVENS (tableau 7) a donné, dans les sols de limon faiblement acides, des résultats sensiblement égaux à ceux de la méthode à l'acétate d'ammonium (technique METSON).

Dans les sols d'argile à silex, les valeurs de S. B. E. peuvent être, avec une seule percolation, nettement inférieures à celles obtenues avec l'acétate d'ammonium. Dans ces cas, une deuxième percolation déplace parfois encore une quantité relativement importante de bases.

L'état granuleux du sol, entraînant une percolation trop rapide, pourraît être la ou une des causes de ce déplacement incomplet (ceci ne s'observant pas ailleurs, avec des sols légers et l'acétate d'ammoniaque, voir p. 197).

Enfin, quel que soit le pH, la valeur de H échangeable paraît relativement constante. LIVENS, lui-même, indique d'ailleurs qu'une seule percolation d'acétate de calcium ne déplace qu'une partie, variable avec les sols, de l'hydrogène échangeable.

Méthode Mehlich (1948).

La méthode MEHLICH nous a fourni des résultats généralement inférieurs à ceux obtenus par la méthode METSON (tableau 8).

Nous pouvons rapprocher ces observations de celles de VAN HOVE, VAN RUYMBEKE et LEENHEER (1956). Ces auteurs indiquent qu'après la fixation du Ba, des percolations réitérées de NH_4Cl libèrent à chaque fois des quantité décroissantes de Ba.

TABLEAU 8

Comparaison des résultats obtenus dans la détermination de la capacité d'échange par l'emploi des méthodes MEHLICH *et* METSON.
(Influence de diverses modifications apportées à la méthode MEHLICH*).*
en m.e. pour 100g.

Numéros	Poids de terre	Déplacement du Ba fixé	Résultats MEHLICH	Valeur ou moyenne MEHLICH	METSON
5 589	20 g	Cl_2Ca	9,2–9,6–9,7	9,5	9,6
5 006	10 g	»	10,4	10,4	13,8
5 016	»	»	10,9	10,9	14,6
5 000 C	»	»	11,5	11,5	15,2
5 348 B	»	Ac. Am	14,0		
»	»	HCl 5*n* « P »	13,4	12,9	12,1
»	»	HCl 5*n* « A »	11,4		
5 345	»	Cl_2Ca	13,3		
»	20 g	»	13,3–13,1	13,2	13,8
5 000 B	10 g	»	13,2	13,2	17,2
5 348 A	»	»	13,8–12,9–14,1	13,6	11,3
5 010	»	»	16,1	16,1	18,9
5 000 A	»	»	15,8–16,3–17,3	16,4	18,2
»	20 g	»	15,9–16,8		
5 002	10 g	»	17,0–15,5–19,6–14,3	16,6	17,7
5 014 A	»	Ac. Am	19,9		
»	»	HCl 5*n* « P »	16,3	18,0	19,2
»	»	HCl 5*n* « A »	17,7		
5 346	»	Cl_2Ca	20,3–20,1–19,2		
»	»	Ac. Am.	17,6–17,1	18,1	15,7
»	»	HCl 5*n* « P »	9,0?	(9,0 non	
»	»	HCl 5*n* « A »	14,1	compris)	

Légende pour le déplacement par HCl 5*n* : « P » = percolation
« A » = agitation

Pour vérifier s'il en était de même, après extraction de Ba par Cl_2Ca, selon la technique MEHLICH (1948), la terre a été mise dans un bécher pendant deux jours, au contact de 30 à 40 cc d'eau et de 5 cc d'HCl concentré. Au bout de ce temps, la suspension filtrée présentait la réaction du baryum, indiquant ainsi l'échange incomplet du Ba.

Pour déplacer le Ba fixé, nous avons remplacé le chlorure de calcium par l'acétate d'ammonium, l'acide chlorhydrique 5 N en percolation ou en agitation. Les résultats (tableau 8) n'ont pas été meilleurs et dans le cas de l'HCl 5N, le dosage du Ba est gêné par la présence d'une forte quantité de fer solubilisé par l'acide.

Une autre source d'erreur réside dans l'élimination par l'eau du Ba non fixé par le sol. De prime abord, la quantité indiquée nous a paru insuffisante et nous avons vérifié qu'effectivement la continuation du lavage par l'eau, fournissait des filtrats présentant la réaction du baryum, bien après la fin théorique du lavage.

Ceci amène à faire deux hypothèses :

— ou l'élimination du Ba non adsorbé est incomplète après lavage avec la quantité précitée d'eau.

— ou la continuation du lavage entraîne l'hydrolyse du Ba échangeable.

Dans les deux cas, les résultats sont faussés. Mais les valeurs obtenues étant, dans l'ensemble, inférieures à celles fournies par la méthode à l'acétate d'ammonium, il faudrait penser que les deux phénomènes, élimination puis échange incomplets, ne se compensent pas.

Méthode Riehm (1954) :

La détermination de la capacité d'échange suivant la méthode RIEHM, a fourni des résultats légèrement inférieurs, en moyenne, à ceux obtenus par le procédé METSON (tableau 9). Mais en pratique, les résultats obtenus par un procédé sont, ou inférieurs ou supérieurs à ceux de l'autre, sans qu'il y ait systématiquement effet dans un sens déterminé, et ceci, que le sol soit acide ou alcalin.

L'écart augmente, lorsque l'addition de 500 mg de CO_3Ca, conformément aux indications de l'auteur, n'a pas été effectuée dans les sols peu ou pas calcaires, que le pH soit alcalin ou acide. Dans ces variations, la proportion de matières organiques par rapport à l'argile ne paraît pas influer, non plus que l'état de celle-ci (rapport M.O/N).

La technique de RIEHM nous ayant paru comporter une source d'erreur due à la libération d'Am par décomposition partielle de la matière organique par l'oxalate d'ammonium, une évaluation de cette libération a été tentée.

Pour cela ,après clarification suffisante, le liquide surnageant a été siphonné, Par addition d'acide sulfurique, la matière organique solubilisée précédemment, flocule. Le précipité est filtré, lavé puis distillé en présence de soude.

Les quantités d'Am recueillies ont été les suivantes :

en m.e. pour 100 g.

sol nº	5014 A	5014 B	5010	5016	5020
m.e. Am	0,3-0,4	0,3-0,4	0,5-0,6	0,5-0,6	0,5-0,8

ainsi en moyenne 0.5 m.e. Am est fourni par la dissolution de la matière organique, par action de l'oxalate d'ammonium.

En fait, l'apport d'Am doit être un peu plus élevé, car cet essai n'a récupéré que l'ammoniac de la matière organique précipitable par l'acide sulfurique. La fraction de matière organique dégradée en formes plus simples (ammoniacale ou non précipitable par SO_4H_2) n'est pas récupérée par le dosage.

TABLEAU 9

Comparaison des valeurs obtenues dans la détermination de la C. E. sur divers sols, en employant différentes méthodes.

en m.e. pour 100g.

Numéros	METSON	MEHLICH	RIEHM		JAWORSKY	LIVENS	BOWER	Ac. Am.	KCl
			sans CO_3Ca	avec CO_3Ca				/30 g	/30 g
5 007 A	9,3			6,5		10,9–12,3		7,7	7,5
5 589	9,6	9,5							
5 348 A	11,3	13,6		10,5–9,0	11,0–11,2				
5 348 B	12,1	12,9		11–12,5–13,0					
5 048	13,4		14,0	14,0			13,5		
5 006	13,8	10,4				14,6–15,2		10,6	11,6
5 345 A	13,8	13,2	12,0		15,2	14,1–14,7		11,2	11,7
5 345 B	13,8		15,0						
5 049	14,1				14,0		11,1		
5 344	14,5		15–13	15–14	14,4				
5 013 A	14,5			15,0			18,2–18,4		
5 044	14,5						17,8		
5 016 A	14,6	10,9	13,9	12,5–13	14,2		14,2		
5 012 A	14,7						13,7		
5 000 C	15,2	11,5	16,6	14,5					
5 005	15,6		15,5–17	16,6–20					
5 345 C	15,6			16–17					
5 349	15,6			14,5–15,5			13,7		
5 346	15,7	18,1		15,5–16	14,9				
5 347	16,5			16–16			16,0		
5 024	16,8				17,4				
5 014 B	16,8		16,6	13,5			14,2		
5 000 B	17,2	13,2	17,6	16,6					
5 002	17,7	16,6	18,2	18,7	17,2–17,7		16,0		
5 000 A	18,2	16,4	19,8	22,3				15,3	16,5
5 009	18,2		16,0				16,1		
5 010	18,9	16,1	17,7–18	15,7–19			18,8		
5 014 A	19,2		17,6	15,0	17,4–18,1		18,1		
5 023	20,4					13,2–21,2		17,1	18,3
5 029	22,8			23,5					
5 019	24,3					21,0–23,1		18,6	24,1
5 025 A	25,8					21,3–25,9		23,4	25,0
5 018	28,8						32,4		
5 020	29,1		30,2	25,3			31,8		
5 343	31,6			30–32					
5 025 B	32,4			29–30					

Méthode Jaworsky (1959) :

La méthode JAWORSKY (tableau 9) a donné des résultats sensiblement identiques à ceux de la méthode METSON, ce qui tendrait à prouver que la durée de contact plus longue (4 jours au lieu d'une douzaine d'heures) n'a que peu d'influence sur la détermination de la capacité d'échange.

Cette méthode a été employée par JAWORSKY pour mesurer seulement la capacité d'échange (et non l'ensemble capacité d'échange-bases échangeables). Les manipulations sur Büchner (filtration de la suspension de sol et déplacement de l'Am fixé par KCl pH 2,5) sont moins pratiques que le système de percolation automatique employé à la Station.

Ces raisons nous ont fait abandonner cette méthode.

Méthode à l'acétate de soude de Bower (1952) :

Cette méthode, comme les précédentes, réalise la saturation du sol. Elle a été mise au point par BOWER, REITERMEIER et FIREMAN (1952) pour mesurer la capacité d'échange dans les sols calcaires.

Quoiqu'ayant limité la présente étude aux sols « non calcaires » — (moins de 10 pour mille de CO_3Ca) — nous avons essayé cette méthode pour évaluer les différences possibles avec les résultats obtenus par la méthode à l'acétate d'ammonium, dans le cas des sols renfermant de 1 à 10 p. cent de CO_3Ca.

BOWER et ses collaborateurs de 1952 ont mesuré les solubilités respectives des carbonates alcalino-terreux du sol dans ces deux acétates. Ils indiquent les valeurs suivantes :

Solubilité des carbonates (en m.e. par litre)

	dans l'acétate d'Am pH 7,0	dans l'acétate Na pH 8,2
Calcite	17,10	1,62
Dolomite	9,40	0,75
Magnésite	1,44	1,15

De notre côté ayant percolé sur filtre 50 mg CO_3Ca R. P. pulvérisé, la solubilisation a été la suivante :

— avec 250 cc d'eau distillée : 2 mg soit 0.04 m.e. pour 1
— avec 250 cc Ac. Am pH 7,0 : 49 mg soit 0.98 m.e. pour 1
— avec 250 cc Ac. Am pH 8,2 : 29,5 mg soit 0.59 m.e. pour 1

TABLEAU 10.

Capacité d'échange, Ca échangeable et degré de saturation obtenus en sols faiblement calcaires, par l'acétate d'ammonium et l'acétate de sodium.

Numéros	pH	Argile ‰	M. O. ‰	CO_3Ca ‰	Capacité d'échange en m.e. pour 100 g			Ca échangeable en m.e. pour 100 g			Degré de saturation en Ca		
					par Am.	par Na	Différence	par Am.	par Na	Différence	C. E. par Ac.Am. / Ca. extrait par Ac. Am.	Ac.Am. / Ac. Na	Ac.Na. / Ac. Na
5 009	6,9	222	35,0	0	18,2	16,1	+ 2,1	16,1	16,1	0,0	89	89	100
5 347 A	6,9	166	35,6	0,4	16,5	16,0	+ 0,5	17,9	17,1	+ 0,8	108	104	107
5 010	7,2	245	34,0	0	18,9	18,8	+ 0,1	18,8	18,3	+ 0,5	100	97	97
5 349	7,4	188	37,2	2,0	15,6	13,7	+ 1,9	17,9	16,0	+ 1,9	115	103	117
5 048	7,5	140	31,8	1,2	13,5	13,5	0,0	15,1	15,0	+ 0,1	112	111	111
5 020 A	7,5	326	46,6	3,0	29,1	31,8	— 2,7	29,8	26,5	+ 3,3	102	91	83
5 049	7,7	154	32,1	1,7	14,1	11,1	+ 3,0	16,4	15,1	+ 1,3	116	107	136
5 002	7,8	193	33,5	4,0	17,7	16,0	+ 1,7	22,8	19,8	+ 3,0	129	112	144
5 014 A	7,9	205	33,5	4,0	19,2	18,1	+ 1,1	21,8	20,5	+ 1,3	113	107	113
5 014 B	8,3	211	20,0	3,0	16,8	14,2	+ 2,6	21,6	18,0	+ 3,6	129	107	127

Sans atteindre la diminution due à l'emploi de l'acétate de sodium, celle qui résulte de l'élévation du pH de l'acétate d'ammonium n'en est pas moins sensible et intéressante à noter.

Pour les sols, la détermination comparative de la capacité d'échange, de Ca échangeable, par ces deux acétates a fourni les chiffres rassemblés dans les tableaux 9, 10, 11.

TABLEAU 11

Valeurs de CE et de Ca échangeables pour quelques sols modérément calcaires, déterminées par l'acétate de Na.

Numéros	PH	‰ Argile	‰ M. O.	‰ CO_3Ca	C. E.	C. E.	Différence	Ca échangeable
					Ac. Am.	Ac. Na		Ac. Na
5 017 A	7,9	406	59,6	5,6		13,4		41,6
5 013 B	7,9	265	15,8	7,0		19,6		21,4
5 018	7,9	327	42,1	19,1	28,8	32,4	— 3,6	
5 020 B	8,0	428	24,5	11,8		32,6		31,4
5 012 A	8,0	157	32,1	7,7		13,7		17,8
5 011	8,1	183	35,7	6,0		17,0		21,0
5 013 A	8,1	223	30,0	21,0		18,3		20,2
5 012 C	8,2	168	15,9	53,1		10,5		15,4
5 001	8,2	193	40,0	17,0	18,8	20,8	— 2,4	21,8
5 012 B	8,3	151	11,9	13,3		10,0		14,2
5 015	8,3	297	54,0	15,2		28,2		28,6

L'examen de ces résultats permet les constatations suivantes :

En sol sans carbonate, l'acétate de sodium normal pH 8.1/8.2, déplace sensiblement autant de calcium que l'acétate d'ammonium normal pH 7.0.

Quand le sol est faiblement calcaire, l'acétate de sodium extrait moins de calcium que l'acétate d'ammonium. Mais dans ce cas, la quantité de Ca mise en solution par l'acétate de sodium est généralement encore supérieure à la capacité d'échange, que celle-ci soit mesurée à l'acétate d'ammonium ou à l'acétate de sodium.

En ce qui concerne la capacité d'échange elle-même, les valeurs sont du même ordre de grandeur lorsque déterminées par l'un ou l'autre de ces deux acétates. Mais le chiffre obtenu par l'acétate de sodium paraît un peu inférieur à celui fourni par l'acétate d'ammonium quand le sol ne renferme pas de CO_3Ca ou seulement des quantités très faibles. Ceci est en accord avec le pouvoir déplaçant inférieur de Na par rapport à Am signalé par RUSSELL (1953).

Cette question de la solubilisation différente du calcaire du sol nous conduit à examiner un point soulevé par CHAPMAN et KELLEY.

Solubilisation du calcaire et capacité d'échange

CHAPMAN et KELLEY (1930) estiment possible tant que des ions Ca sont en solution au contact du sol (comme dans toute méthode de lessivage en présence de CO_3Ca) qu'un peu de Ca soit adsorbé par le sol, si bien que le lessivage ne produirait pas une saturation quantitative du complexe adsorbant du sol par le cation d'échange.

Pour vérifier l'ordre de grandeur de cette influence, nous avons réalisé l'essai suivant sur deux terres, l'une acide, l'autre faiblement calcaire :

Essai :

— Lessivage par HCl N/20 jusqu'à absence de Ca dans le filtrat.

— Lavage à l'alcool à 95° jusqu'à absence de Cl dans le filtrat.

— Evaporation à sec du percolat en vue de chasser le maximun d'HCl.

— Constitution d'une solution en reprenant le résidu sec par l'eau.

— Percolation du sol (4 fois) par cette solution de manière à fixer sur le sol débarrassé de CO_3Ca, les bases échangeables et le calcaire solubilisé par la première percolation à HCl N/20.

Les résultats suivants ont été obtenus : en m.e. pour 100 g.

N°	CO^3Ca ‰	C.E. après double percolation	C.E. METSON ordinaire	C·E. METSON pour $CO^3Ca < 50$ ‰
5006	0	12,3 et 12,7	13,6	
5644	4,7	13,3 et 13,4	14,4	14,3

Eu égard aux pertes possibles au cours du double lessivage, à l'altération possible du complexe par HCl N/20, il semble permis de considérer ces résultats comme identiques et de penser que l'élimination complète du CO_3Ca n'a pas modifié dans ce sol peu calcaire, la quantité d'Am fixé.

Les comparaisons de méthodes dont les résultats viennent d'être précédemment indiqués, nous ont montré que si des écarts sensibles se manifestent parfois, les méthodes les plus couramment employées actuellement fournissent des résultats assez voisins l'un de l'autre, compte tenu des erreurs analytiques permises. La pratique de ces méthodes nous a montré également que certaines présentaient des difficultés techniques alors que d'autres se révélaient d'emploi plus facile dans notre laboratoire.

Etant donné que toute méthode comporte une part de conventionnel, et à la suite des considérations développées par METSON nous avons pensé que la méthode à l'acétate d'ammonium, suivant la technique de cet auteur, devait être prise sérieusement en considération, pour cette première étude de base et en raison du souci de la qualité technique des manipulations.

Aussi voudrions-nous maintenant examiner plus spécialement l'emploi de l'acétate d'ammonium dans la détermination de la Capacité d'Echange.

EMPLOI DE L'ACÉTATE D'AMMONIUM

Nous avons déjà indiqué que nombre d'objections et de critiques avaient été faites à la méthode à l'acétate d'ammonium. Sans vouloir les passer toutes en revue, nous voudrions revenir sur celles qui nous paraissent les principales.

Elles ont trait aux points suivants :

1. Influence du degré de saturation du sol.
2. Grosseur des ions de la solution d'échange.
3. Influence du type de l'argile.
4. Fixation d'Am sous forme non récupérable.
5. Déplacement de l'Am adsorbé.

6. Solubilisation de l'humus.
7. Influence du pH de la solution d'échange.
8. Durée de percolation.

Certaines critiques purent être réexaminées d'après les travaux de divers auteurs. Des essais de contrôle furent nécessaires pour vérifier la validité des autres objections invoquées.

1. *Influence du degré de saturation.*

MEHLICH (1945) observe qu'avec une saturation en bases accrue, à pH 7,0 (degré qui peut varier selon lui de 40 à 100 p. 100) l'accord, entre sa méthode et celle à l'acétate d'ammonium, augmente. Par contre, pour PRATT et HOLOWAYCHUCK (1954) les différences quant aux valeurs de S et T sont aussi importantes pour des degrés de saturation aussi bien proches de 0 que de 100 p. 100. Mais divers auteurs et eux-mêmes en particulier, indiquent qu'en lessivant par l'acétate d'ammonium, les ions H^+ tendent à devenir partie intégrante du système d'échange, au même titre que les ions Am^+ et à se fixer simultanément sur le complexe adsorbant. Il en résulterait évidemment une erreur par défaut augmentant avec la quantité d'H^+ échangeable, donc avec l'acidité du sol.

Il nous paraît cependant logique de faire la remarque suivante : L'échange de bases procède par équilibre et dans la technique par percolation, les ions échangés sont éliminés du système à mesure de leur déplacement. Il semble permis de penser, considérant les quantités d'H^+ et d'Am^+ en présence et l'acidité modérée des sols étudiés, que l'échange devrait être sinon total, du moins très poussé.

En effet, supposant un sol dont la capacité d'échange est de 10 m.e. pour 100 g, dont les ions échangeables sont constitués par 50 p. 100 d'hydrogène, pour 10 g de sol en percolation, il existe un total de 1 m.e. dont 0.5 m.e. est de l'hydrogène. Le lessivage par 250 cc d'acétate d'ammonium normal met en présence 250 m. e. d'Am soit une balance de 500 contre 1.

Avec un sol à 20 m.e. et la même proportion d'hydrogène, le rapport est encore de 250 contre 1, ce qui semble encore largement suffisant pour réaliser un échange complet. VAN DER MAREL (1954) ne descend pas au-dessous de 250 cc de 0.5 N pour 10 g de sol.

A ce problème de la saturation du sol peut-être rattaché celui de la grosseur des ions de la solution d'échange.

2. *Grosseur des ions de la solution d'échange.*

La grosseur des ions de la solution d'échange paraît en effet avoir une influence sur la capacité d'adsorption de l'argile, mais cette question est encore controversée. BARSHAD (1952), par exemple, indique que Na^+ et Ca^+ s'insèrent plus facilement dans les argiles que Am^+ et K^+ dont le diamètre est plus grand. Dans un article ayant trait à la fois à la grosseur des ions et au type de l'argile, SAWHNEY, JACKSON et COREY (1959) avec des sols à Montmorillonite, obtiennent pour la capacité d'échange des valeurs sensiblement identiques en les saturant par Ca ou K. Mais, avec des sols à Vermiculite, K déplacé par l'acétate d'ammonium fournit des chiffres bien inférieurs à ceux obtenus par Ca déplacé par le même acétate et plus encore quand Ca est déplacé par l'acétate de sodium.

La conclusion de ces auteurs est qu'une méthode générale de mesure de la capacité d'échange doit utiliser des ions de petit diamètre, à la fois pour la saturation du sol

et le déplacement du cation fixé, étant donné que des quantités appréciables de vermiculite existent souvent dans les sols.

METSON (1956) qui emploie cependant l'ammonium, admet une limitation de l'échange par la taille du cation.

Cependant DEMOLON (1948) écrit « la capacité de saturation des colloïdes argileux apparaît donc comme une grandeur définie, indépendante de la nature des ions fixés ». MOREL (1957), dans un travail plus récent, après des essais de fixation d'ions de grande dimension, conclut qu'il ne semble pas y avoir d'empêchement stérique.

3. *Influence du type de l'argile.*

Étant donné que certaines argiles peuvent fixer, en plus des bases échangeables proprement dites, des cations entre leurs feuillets, on doit penser que la nature de l'argile peut également influer lors de la détermination de la capacité d'échange.

C'est ainsi que MEHLICH (1945) signale une bonne concordance entre les résultats obtenus avec l'acétate d'ammonium et ceux fournis par le chlorure de baryum tamponné à la triéthanolamine, pour les argiles de type 2 : 1 (montmorillonite, vermiculite, illite) tandis que l'acétate d'ammonium conduit à des résultats plus faibles avec les argiles de types 1 : 1(kaolinite) et les sols organiques.

Par contre, BARSHAD (1954) indique que l'acétate d'ammonium n'est pas très bon pour mesurer la capacité d'échange de la vermiculite.

Au cours d'essais préliminaires S. HENIN (1) nous avait indiqué que les quelques sols de limon soumis à son examen comprenaient soit un mélange d'illite, vermiculite, kaolinite, soit un mélange d'argile à feuillets écartés de 10 à 14 Å et de la kaolinite, tandis que l'argile extraite des sols d'argile à silex était formée d'illite et d'un peu de kaolinite.

D'après la remarque de MEHLICH, les résultats que nous avons obtenus devraient donc être en bon accord avec ceux que l'emploi de son mode opératoire avait fournis. On a vu précédemment que nos résultats suivant MEHLICH étaient un peu inférieurs à ceux de l'acétate d'ammonium, mais nous avons signalé que le déplacement du Ba fixé ne paraissait pas complet.

Après avoir examiné ces facteurs ayant trait à la saturation du sol par l'ammonium, il faut voir le comportement et le déplacement de ce cation fixé. Deux points en particulier :

— L'ammonium peut se fixer sous forme non récupérable ;

— Comment déplacer l'Am adsorbé par le sol ?

4. *Fixation d'ammonium sous forme non récupérable.*

Signalons d'abord que la définition de l'Am « fixé » et les techniques de « fixation » diffèrent quelque peu suivant les auteurs.

Pour ALLISON, DOETSCH et ROLLER (1951) par exemple, l'Am « fixé » est la fraction non déplaçable par KCl. BARSHAD (1951) détermine l'Am fixé en faisant la différence des quantités récupérées par deux distillations, l'une déplaçant l'Am par NaOH, l'autre déplaçant une quantité inférieure d'Am par KOH.

Les techniques de « fixation » diffèrent également : CHAMINADE (1940) maintient un contact de quinze jours. BARSHAD (1951) laisse sécher le sol, ALLISON et ses colla-

(1) Nous adressons ici nos remerciements à Monsieur S. HENIN pour l'aide qu'il nous a apportée dans ces déterminations.

borateurs (1951-1953) Hanway et Scott (1956) laissent ou non sécher et chauffent ou non le sol en indiquant que la fixation est plus importante par dessiccation, chauffage. Pour Bower (1950) Stanford et Pierre (1946), cette fixation est plus forte également pour les sous-sols qui n'ont que très peu ou pas d'ammonium formé par décomposition des matières organiques, tandis que pour les sols de surface, ces auteurs la donnent comme généralement inférieure à 1 m. e. pour 100g. Les techniques de fixation signalées plus haut paraissent avoir une action « fixative » plus développée que le simple contact du sol avec la solution percolante. Le temps de contact dans la majorité des cas de nos essais était de l'ordre de douze heures, mais inférieur à vingt heures. Metson (1956) d'ailleurs, indique nettement qu'une durée de percolation inférieure à deux ou supérieure à vingt-quatre heures peut conduire à des résultats erronés.

La « fixation » selon Barshad (1951) est à rapporter parfois aux fractions grossières de biotite et vermiculite. Elle fait également intervenir la nature de l'argile. Illite, montmorillonite, vermiculite « fixant » des quantités relativement fortes d'ammonium, tandis que la kaolinite n'en fixe pas ou très peu.

En présence de ces facteurs pouvant favoriser ou réduire la « fixation » d'ammonium qui risquaient d'intervenir dans nos analyses, nous avons voulu évaluer l'ordre de grandeur de cette « fixation » éventuelle lors de l'étude du déplacement de l'Am fixé.

5. *Déplacement de l'ammonium adsorbé.*

Deux procédés sont surtout utilisés et ont été comparés par différents auteurs :
— le déplacement par lessivage du sol ;
— la distillation directe du sol en présence d'une base.

Allison, Roller et Doetsch (1953) travaillant sur une vermiculite du Montana, capable de « fixer » 80 m. e. Am pour 100 g, parviennent à déplacer la totalité de l'ammonium (« fixé » + échangeable) par une distillation avec NaOH 0.2N. Dans les mêmes conditions KOH 0.2N n'en déplace qu'une faible partie. L'extraction de l'Am (fixé + échangeable) sur le même matériel, par lessivage NaCl est presque complète, mais ce déplacement est excessivement long.

Dans une autre publication, Allison et Roller (1955), qui ont particulièrement étudié la fixation et le déplacement de l'ammonium, comparant différents chlorures et l'acide chlorhydrique, comme agents de déplacements, indiquent que NaCl extrait la plus forte quantité d'ammonium, et KCl la moindre. En outre, la quantité d'Am fixé apparaît plus forte, par différence de la double distillation NaOH-KOH que par extraction à KCL. Allison et Roller attribuent ce fait à la contraction du réseau par chauffage à 100° en présence de KOH, cә qui serait à rapprocher de l'observation de Lambert-Wiklander (1947) sur la diminution de l'échangeabilité des ions adsorbés sur l'argile par chauffage dans l'eau à 100°. De cette observation, Allison conclut que la distillation du sol est une bonne méthode pour déterminer la capacité maximum d'absorption de l'Am, mais qu'elle ne permet pas de doser l'ammonium fixé en présence d'ammonium échangeable.

Pratt et Holowaychuck (1954) signalent qu'après seize heures de contact sol-solution d'acétate d'ammonium, la distillation directe du sol avec 20 cc de soude normale a récupéré 100% de l'Am adsorbé, tandis qu'un lessivage à NaCl n'en récupérait que 97,5%.

Barshad (1951) estime de même la distillation comme plus efficace que le les-

sivage, l'alcalinisation par Ba $(OH)_2$ ou NaOH déplaçant presque tout l'ammonium fixé tandis que MgO et KOH sont moins actifs.

HANWAY et SCOTT (1956) ont comparé pour le dosage de l'Am « fixé », la double distillation NaOH-KOH et le dosage par deux attaques Kjeldahl qui donnent :

— (N provenant de la matière organique du sol + N provenant de la solution ammoniacale de percolation)

moins (N provenant de la matière organique).

Dans les deux cas les résultats étaient comparables, justifiant la double distillation NaOH-KOH, plus simple que la kjeldahlisation.

Rappelons également que VAN HOVE, VAN RUYMBEKE et LEENHEER (1956) ayant adopté la technique MEHLICH, mais modifié le procédé d'extraction du baryum fixé, ont, par déplacement au moyen de l'ion H^+ (HCl 0.5N) des résultats supérieurs à ceux obtenus par l'ion NH_4^+(NH_4Cl 0.1N).

La différence dans l'étendue de l'extraction d'un cation adsorbé, suivant le cation échangeur employé, n'est donc pas limitée à la méthode à l'acétate d'ammonium — et à l'ion ammonium — mais se produit également avec d'autres procédés.

Ces motifs étant exposés, nous nous sommes servi d'une méthode de BARSHAD (1951) pour évaluer la quantité d'Am qui pouvait être « fixée » par nos sols. Cet auteur estime comme « Am fixé », la différence des quantités d'ammonium déplacées par deux distillations : l'une en présence de $Ba(OH)_2$ ou de NaOH, et l'autre en présence de KOH ou MgO.

Des essais comparatifs de déplacement de l'ammonium par MgO et NaOH ayant montré que la soude déplaçait un peu plus d'Am que la magnésie, la technique METSON *loc. cit*) elle-même très proche de celle de l'A. O. A. C. (1955) (employant MgO comme déplaçant) a été modifiée de la manière suivante :

Une première distillation de sol en suspension dans l'eau est effectuée en présence de MgO. Puis, quand le dégagement d'ammoniac a cessé, le chauffage est arrêté. On ajoute 50 cc NaOH normale et on effectue une deuxième distillation en recueillant les deux distillats séparément. Les résultats de cet essai sont donnés dans le graphique 2. Ils montrent que la « fixation » d'ammonium non déplaçable par MgO est faible. Pour des capacités d'échange de 4 à 30 m. e., la quantité fixée, (c'est-à-dire réellement « fixée » + l'ammonium qui peut provenir d'une dégradation de la matière organique par la soude) varie de 0.2 à 1 m.e. (chiffres voisins de ceux cités précédemment) soit une quantité moyenne de 4 p. 100 avec maximum rare vers 10 p. 100).

Nous pensons qu'une certaine attaque de la matière organique doit avoir lieu malgré la distillation rapide par entraînement à la vapeur. De cette manière et quoique ALLISON et ROLLER (1955) n'aient pas trouvé d'influence nette à la quantité de soude utilisée, on évite la concentration du liquide et, dans une certaine mesure, l'attaque de la matière organique. Cependant lors de la distillation en présence de magnésie, les liquides restaient pratiquement incolores, tandis que même avec la faible quantité de soude utilisée (volume total à distiller 300-400 cc), ils devenaient colorés en brun, indiquant par là une dissolution de la matière organique.

Cet indice d'attaque nous fait exprimer des réserves à l'égard de la distillation directe du sol en présence de soude 4N de BARROWS et DROSDOFF (1958), bien que ces auteurs n'aient obtenu que des résultats un peu plus faibles par distillation alcaline de l'extrait de sol déplacé par NaCl. Un fait qui nous semble accréditer cette « c d'attaque partielle de la matière organique est que, dans ce cas les différences

entre les deux distillations (directe du sol et de l'extrait NaCl) sont moins prononcées dans les sous-sols moins riches en matières organiques.

Ce risque de dégradation des constituants azotés du sol militerait en faveur du déplacement de l'ammonium par l'aération de la suspension de sol, en présence de CO_3Na_2 — en dépit de la longueur du procédé dans certains cas — pour lequel KELLEY (1957) indique que le danger de décomposition des composés azotés est largement éliminé.

Avec ce risque de dégradation nous sommes amenés à examiner l'action des solutions de percolation sur l'humus.

6. *Solubilisation de l'humus.*

PURI et UPPAL (1939) signalent qu'en sol humifère, la valeur obtenue pour la capacité d'échange, risque d'être inférieure à la capacité d'échange réelle du sol en raison de la perte d'humus par solubilisation, GOLDEN, GAMMON et THOMAS (1942) concluent de même. PERKINS (1952) indique que l'acétate d'ammonium fournit des valeurs un peu plus faibles que le chlorure d'ammonium et attribue ce fait à la dissolution de matière organique par l'acétate.

Il est évident que le lessivage par un acétate de cation alcalin peut entraîner le passage en solution d'une certaine fraction de l'humus, réduisant ainsi la fixation d'Am, d'où la valeur de la capacité d'échange. Mais avec les sols apparentés aux « limons » que nous avons analysés, cependant assez riches en matières organiques, le lessivage à l'acétate d'ammoniaque pH 7,0, n'a fourni que des percolats extrêmement peu colorés. Aussi pensons nous pouvoir tenir pour négligeable l'erreur due à cette solubilisation partielle.

KICK (1951) parvient à une conclusion identique. En déterminant par le permanganate, la quantité d'humus solubilisé par l'acétate d'ammonium N/5, cet auteur a obtenu des chiffres variant de 14 à 26 mg pour 100 g. Ces valeurs conduisent à une erreur sur la capacité d'échange inférieure à 0,1 m.e. pour 100 g. de sol, en admettant une capacité d'adsorption de 400 m. e.pour 100 g de cette matière organique solubilisée

Il n'en a pas été de même lorsque nous avons appliqué cette méthode à des sols tourbeux ou des terreaux qui ont fourni des percolats dont la couleur variait du brun au noir. Dans ce dernier cas l'avantage d'un cation alcalino-terreux est manifeste.

Il a déjà été signalé (v. p.185) qu'il y a dissolution nette de matière organique avec la méthode RIEHM, surtout lorsqu'il y a addition de CO_3Ca.

Ayant ainsi examiné diverses questions ayant trait à la saturation du sol, au déplacement de l'ammonium, ainsi qu'aux pertes possibles par solubilisation d'humus il est nécessaire d'examiner l'importance de la réaction de la solution d'acétate d'ammonium.

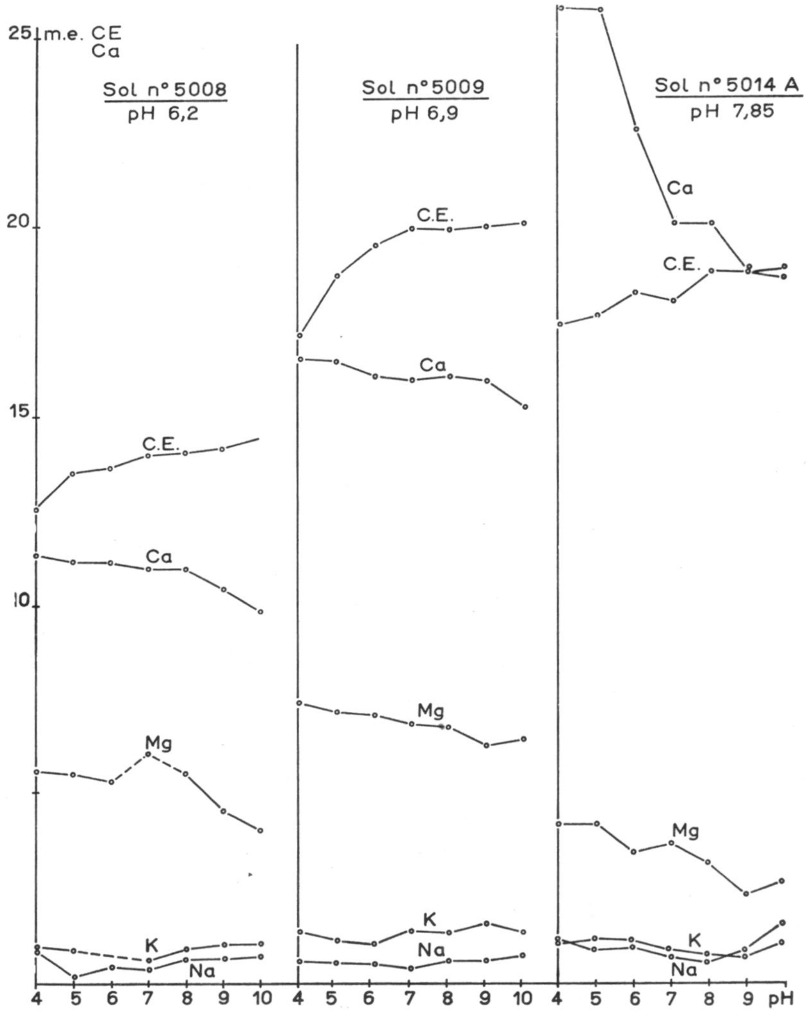
7. *Influence du pH de la solution d'échange.*

Certains auteurs, RIEHM, B. ULRICH et M. ULRICH (1954) MEHLICH (1942) entre autres, estiment que le pH d'échange doit être supérieur à la neutralité. Avec la définition du sol pleinement saturé de BRADFIELD et ALLISON (1933) le pH atteint 8,4. BARSHAD, citant Mac GEORGE, indique qu'en sol alcalin la détermination de l'ammonium adsorbé est meilleure de pH 8,5 à 11,0 qu'à 7,0. Pour déplacer les ions H^+ étroitement liés aux argiles, on a déjà vu que Van DER MAREL (1950) fait un pré-traitement à pH 8,2.

Par ailleurs, Bower (1950) opérant à pH 8, 9, 10, 11, par addition d'ammoniaque, pour vérifier l'influence du pH dans l'acétate, n'a pas trouvé de différence sensible avec la valeur de la capacité d'échange mesurée à pH 7,0.

Il en a été de même dans les sols salins ou alcalins, en augmentant le pH de l'acétate de sodium de 7 à 9 puis à 11. (Bower, Reitermeier, Fireman (1952).

Dans le but de s'assurer de l'effet de la réaction sur nos terres, nous avons lessivé trois sols (acide, neutre, alcalin), par de l'acétate d'ammonium amené à un pH variant de 4 à 10.



GRAPHIQUE 3.

Les résultats résumés dans le graphique 3, mettent en évidence les faits suivants :

Capacité d'échange. — La capacité d'échange croît régulièrement avec le pH de 4 à 7, puis très légèrement de 7 à 10 dans les sols acide, neutre et alcalin.

L'augmentation de la valeur de la capacité d'échange se place entre 8 et 15 p. 100. Mais cette augmentation appelle une constatation importante. En dépit des quan-

tités relativement fortes d'acide acétique et d'ammoniaque nécessaires pour faire passer le pH de la solution d'acétate d'ammonium, respectivement de pH 7 à pH 4 et de pH 7 à pH 10 la quantité d'ammonium adsorbée par le sol ne varie que d'une manière relativement faible (8 à 15 %).

Cette stabilisation relative de la fixation d'Am, pourrait être expliquée par l'existence de charges positives additionnelles développées à bas pH et de charges négatives additionnelles développées à pH élevé. RUSSEL (1953).

Calcium échangeable. — Le calcium échangeable diminue constamment de pH4 à pH10 en paraissant présenter un palier de 7 à 8.

Magnésium échangeable. — Le magnésium diminue également.

Potassium et sodium échangeables. — Les variations du potassium et du sodium sont plus faibles. Un minimum paraîtrait exister dans la zone proche de la neutralité, acidité et alcalinité élevées permettraient de déplacer des quantités supérieures. L'échange par une solution neutre (ou au plus à pH 8,0-8,2) semble ainsi très justifié.

D'autre part les percolats alcalins n'ont pas été plus colorés que les autres : il n'y aurait donc pas de perte de capacité d'échange par dissolution d'humus ou passage en solution d'humate.

Un dernier essai a concerné la méthode à l'acétate d'ammonium : contrôle de l'effet de la durée de percolation.

8. *Influence de la durée de la percolation à l'acétate d'ammonium.*

METSON (1956) indique qu'une percolation trop rapide ou trop lente peut conduire à des erreurs.

Une série de terres assez légères a subi une percolation très rapide (ordre de 1/2 heure à 1 heure) et une percolation de durée normale (douze heures environ).

Les résultats consignés dans le tableau 12, permettent de formuler les conclusions suivantes :

TABLEAU 12

Influence de la vitesse d'échange sur les valeurs de la Capacité d'échange et des bases échangeables.
en m.e. pour 100g.

Numéros	C. E.		T. B. E.		Ca		Mg		K		Na	
	Percolation		Percolation		Percolation		Percolation		Percolation		Percolation	
	lente	rapide	lente	rapide	lente	rapide	lente	rapide	lente	rapide	lente	rapide
4 082	6,1	6,2	2,6	2,5	1,5	1,8	0,40	0,38	0,10	0,10	0,10	0,10
4 074	6,8	6,8	5,5	5,4	4,9	4,9	0,46	0,36	0,60	0,34	0,17	0,18
4 071	7,8	8,1	8,0	8,0	7,6	7,8	0,32	0,24	0,20	0,21	0,14	0,17
4 139	8,6	8,9	9,3	9,3	9,0	9,0	0,40	0,38	0,20	0,19	0,15	0,20
4 084	8,9	8,8	1,6	1,5	0,7	0,9	0,08	0,13	0,16	0,09	0,05	0,13
4 070	9,0	9,0	12,3	11,8	11,1	10,8	0,64	0,42	0,82	0,83	0,24	0,27
4 041	9,1	9,3	10,1	9,4	9,7	9,2	0,27	0,14	0,13	0,13	0,13	0,10
4 054	10,2	11,1	11,9	11,8	10,7	10,7	0,38	0,34	0,23	0,26	0,70	0,70
4 000	10,4	10,9	13,3	13,9	13,3	13,6	0,32	0,17	0,12	0,13	0,15	0,20
4 033	11,2	11,7	12,7	13,0	12,4	12,4	0,52	0,34	0,18	0,18	0,13	0,17
Comparaison des totaux	88,1	90,8	87,3	86,6	80,8	82,3	3,79	2,84	2,74	2,46	1,85	2,22

Les valeurs obtenues pour la capacité d'échange et le calcium échangeable pour des sols non — ou seulement très peu — calcaires sont légèrement supérieurs par un lessivage très rapide. Mais les différences n'étant que de 2 à 3 p. 100, on peut admettre que les valeurs sont identiques, les écarts étant de l'ordre de la précision des dosages.

Les chiffres pour Mg et K échangeables sont plus élevés pour un lessivage de durée normale (respectivement de 27 à 11 p. 100).

Par contre le sodium paraît avoir une valeur moindre par un lessivage lent.

Un autre essai de mesure de la capacité d'échange par fixation de K du KCl, avait conduit aux mêmes conclusions.

Extraction à l'eau distillée :

Enfin pour se rendre compte du pouvoir solubilisant de l'eau vis-à-vis des sels solubles et des éléments échangeables, nous avons lessivé 10 g de terre par 250 cc d'eau distillée.

Nous avons dosé, dans l'extrait, le total des bases échangeables selon la technique BRAY et WILHITE (1929) reprise par METSON, et distillé la terre en présence de MgO pour y doser l'Am déplaçable.

Les résultats sont rassemblés dans le tableau suivant :

N°	5078	4060	4097	5453	4084	4066	4725	5456
T.B.E. m.e. pour 100 g......	0,5	0,6	0,9	1,0	1,0	1,0	1,2	2,0
Am déplacé m.e. pour 100 g..	1,4	1,5	1,5	1,4	1'9	2,1	1,7	3,1

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

Limitée au cas des sols non calcaires, l'étude bibliographique montre que les méthodes de détermination de la capacité d'Échange sont très nombreuses. Elles opèrent sensiblement suivant deux procédés :

— déplacement des bases échangeables, de l'hydrogène échangeable et addition de ces quantités.

— saturation du sol par un cation déterminé, puis déplacement et dosage de la quantité du cation absorbé.

Les essais entrepris ont eu pour but de comparer les principales méthodes utilisées actuellement.

Le dosage direct de l'hydrogène échangeable nous a paru assez illusoire en raison de son imprécision. En conséquence il ne semble pas possible d'obtenir une bonne mesure de la capacité d'échange par le premier procédé (S. B. E. + H).

La détermination de la capacité d'échange dans un but expérimental avec différents acétates, suivant la technique VAN DER MAREL (1950), a été relativement longue, délicate et paraît manquer de fidélité.

Un point demeure cependant acquis : en employant des cations alcalino-terreux, la capacité d'échange a une valeur plus élevée, qu'en saturant le sol par un cation alcalin. Il en est de même lorsqu'on sature le sol en Ba ou K par le chlorure. Comparé à ces deux méthodes, l'acétate d'ammonium utilisé suivant la technique METSON (1956) a fourni des résultats intermédiaires.

La technique LIVENS (1954) a fourni des résultats variables en accord dans les « limons » légers et moyens, inférieurs dans les sols de type argile à silex à capacité d'échange plus élevée. Dans ce dernier type de sol, la quantité indiquée de réactif, pour le déplacement des bases échangeables semble être insuffisante.

L'emploi de la méthode MEHLICH (1948) a fourni des résultats légèrement inférieurs à ceux obtenus par le mode opératoire de METSON (1956), ce qui semble dû à un déplacement incomplet du baryum fixé. De plus, cette méthode nécessite de nombreux réactifs.

Appliquée aux mêmes sols, la méthode RIEHM (1954) a fourni des résultats également un peu inférieurs à ceux du procédé METSON. Mais il faut noter pour cette méthode l'avantage présenté par sa rapidité et le peu de manipulations qu'elle nécessite.

La méthode JAWORSKY (1950) fournit des résultats identiques à celle de METSON, d'ailleurs elle s'en rapproche beaucoup mais est cependant un peu moins pratique d'emploi.

La méthode à l'acétate de soude de BOWER (1952) utilisée pour déterminer la capacité d'échange de sols non — ou très peu — calcaires, a conduit à des résultats analogues à ceux obtenus par l'acétate d'ammonium. Elle paraît présenter un grand intérêt pour les sols calcaires, mais rend très difficile, sinon impossible, le dosage de la potasse échangeable, en particulier, dans le percolat d'acétate de soude, en raison même de la grosse quantité de sodium.

Après avoir ainsi examiné diverses méthodes, huit principales critiques concernant le mode opératoire à l'acétate d'ammonium ont été revues.

En admettant que lors du lessivage à l'acétate d'ammonium, H tende à devenir partie intégrante de la solution de saturation, et à se fixer au même titre que Am (ce qui semble d'ailleurs infirmé par les essais concernant le pH de la solution d'Ac Am) il faut reconnaître que la balance Am/H étant au minimum de 200/1 environ et que, dans le procédé par percolation, les ions H étant éliminés du système à mesure de leur déplacement, la saturation du sol par l'Am doit être sinon totale, du moins très poussée.

La grosseur des ions de la solution de percolation, non plus que le type de l'argile du sol, ne paraissent être des obstacles majeurs.

Les essais de dosage de l'ammonium « fixé », suivant la technique BARSHAD (1951), ont montré que la fixation que l'on pouvait penser être importante dans certains sols, grâce à la présence d'illite et de vermiculite, était en réalité assez faible, compte-tenu du risque de dégradation de la matière organique azotée lors de la distillation en présence de soude. Cette dernière, à la suite de la distillation à la magnésie, ne constitue pas, en tout état de cause, de bien grande complication.

Le déplacement de l'ammonium saturant le sol s'effectue facilement par distillation directe de la terre en présence de magnésie. Cela évite ainsi un nouveau déplacement par une autre solution de percolation, procédé, qui selon certains auteurs, serait moins efficace.

Appliquée à des « sols minéraux » du type limon, argile à silex, sols sableux, la saturation par l'acétate d'ammonium paraît solubiliser très peu d'humus. Il n'en est pas de même pour les terreaux et sols tourbeux pour lesquels une saturation avec un ion alcalino-terreux, Ca ou Ba, est nécessaire.

L'influence du pH de la solution d'acétate est manifeste sur tous les éléments dosés.

Lorsque le pH de l'acétate d'ammonium croît de 4 à 10,

— la capacité d'échange croît de pH 4 à pH 7, puis plus légèrement de pH 7 à pH 10.

— calcium et magnésium diminuent ;

— potassium et sodium varient moins. Pour ces deux éléments. il semble exister un minimum de déplacement dans la zone proche de la neutralité.

Quant à la vitesse de percolation de l'acétate, son influence paraît faible sur la capacité d'échange et sur l'échange du calcium. Les valeurs du magnésium et du potassium échangeable sont diminuées par un lessivage rapide, alors que le contraire semble se produire pour le sodium.

En conclusion de cette étude, nous voudrions faire remarquer, après d'autres que le principe et la méthode de détermination des bases échangeables du sol paraît maintenant bien acquis. Par contre, le dosage de l'hydrogène échangeable est beaucoup moins satisfaisant, et les divers essais effectués ont conduit à des résultats, peu convaincants sur leur valeur.

En ce qui concerne la capacité d'échange, comme pour diverses déterminations d'ailleurs, il se révèle que toute méthode peut prêter à critique et comporte une part de conventionnel. Néanmoins, les comparaisons que nous avons faites ont permis de voir que les principales méthodes employées actuellement fournissent des résultats assez voisins.

En conséquence, nous avons adopté la méthode à l'acétate d'ammonium dans son principe, comme méthode permettant à la fois de doser la capacité d'échange et les bases échangeables.

Dans son application, le mode opératoire préconisé par METSON (1956) a été adopté en raison de son caractère pratique et rigoureux.

Nous estimons cependant que l'emploi d'acétate d'ammonium à pH 8,0 ou 8,2 devrait être envisagé, après essais, compte-tenu des résultats déjà acquis, dans le but de réduire la solubilisation du calcaire, et du fait que nombre de sols de notre région, même sans calcaire, ont des réactions franchement alcalines.

Pour des cas particuliers, trois autres méthodes peuvent être envisagées :

La méthode de RIEHM (1954), en raison de sa rapidité et du peu de manipulations qu'elle nécessite, lorsque l'on ne recherche que la valeur de la capacité d'échange.

Une méthode saturant le sol par un cation alcalino-terreux, pour les terreaux et les sols tourbeux ou humifères.

La méthode BOWER (1952) pour les sols calcaires.

Reçu pour publication en Décembre 1960.

APPENDICE

MODE OPÉRATOIRE POUR LA DÉTERMINATION DE LA CAPACITÉ D'ÉCHANGE DES SOLS NON CALCAIRES

Ce mode opératoire est presque intégralement celui indiqué par METSON (1956) pour la première partie. Il dérive de celui de BARSHAD (1951) pour la seconde.

Son principe est de saturer le sol par l'ammonium, d'éliminer l'excès d'Am, de déplacer par la magnésie puis par la soude l'ammonium fixé.

Réactifs

Acétate d'ammonium sensiblement normal pH 7,0.

Préparé à partir d'acide acétique pur cristallisable et d'ammoniaque R. P., sur la base de 57,5 cc d'acide acétique et de 90 cc d'ammoniaque densité 0,925, pour un litre de solution d'acétate. Prendre le pH.

Si celui-ci n'est pas de 7,0, prélever 100 cc de solution et y verser à la burette de l'acide acétique ou de l'ammoniaque dilué (1/2 ou 1/4) jusqu'à ce que la réaction du liquide de cette partie aliquote soit neutre. (pH-mètre).

Rapporter le volume obtenu à celui du liquide total et ajouter la quantité nécessaire d'acide acétique ou d'ammoniaque.

Vérifier que le pH = 7,0 ± 0,05, et terminer l'ajustement si besoin.

(Il est conseillé de fabriquer en une fois, 20 ou 30 litres de 2N, que l'on diluera au moment de l'emploi).

Alcool éthylique.

Cas d'alcool pur. Vérifier la neutralité et l'absence d'ammoniaque comme ci-après. Redistiller si nécessaire.

Cas d'alcool de récupération. — Ajouter du rouge de méthyle aux résidus d'alcool et SO_4H_2 concentré — jusqu'à virage de l'indicateur — et ensuite 1 à 1,5cc SO_4 H_2 supplémentaire par litre de résidus alcooliques (but : rétention de l'ammoniaque).

Distiller au bain marie jusqu'à ce que la température du liquide atteigne 95°C. Jeter le reste d'eau alcoolique.

A ce premier distillat, ajouter par litre, environ 5 g de chaux vive en poudre et redistiller au B. M. jusqu'à ce que la température atteigne 82°C, en rejetant les premières portions du second distillat.

Vérification de neutralité. — A 10 cc d'alcool, ajouter 50 cc d'eau distillée et quelques gouttes de bleu de bromothymol. Le changement de couleur ne doit pas nécessiter plus de 1 goutte de HCL ou Na OH 0,1N.

Vérification de l'absence d'ammoniaque. A 5 cc d'alcool, ajouter 15 cc d'eau distillée et quelques gouttes de réactif de Nessler, qui ne doit pas donner de coloration appréciable.

Préparation de l'alcool de lavage. Ramener le titre de l'alcool à 85° G. L., par addition d'eau distillée.

Ajouter à chaque litre d'alcool ainsi préparé 1 cc NH_4OH normal.

(Cette quantité d'ammoniaque est celle trouvée nécessaire par METSON pour éviter l'hydrolyse de l'Am adsorbé par le sol lors de l'élimination de l'ammonium non fixé).

— Acide borique pur. Solution à 4 p. 100. Dissoudre dans l'eau bouillante puis étendre au volume.
— Acide chlorhydrique décinormal.
— Magnésie calcinée lourde.
— Indicateur mixte : mélanger :
5 parties de vert de bromocrésol à 0,1 p. 100 dans l'alcool à 95° ;
et 1 partie de rouge de méthyle à 0,1 p. 100 dans alcool à 95°.

Appareillage

— Banc à percolation (voir fig. page 202).
— Appareil à distiller par entraînement à la vapeur.

Mode opératoire

Préparation :

— Garnir la douille d'un tube à percoler avec de la ouate, en tassant fortement.
— Peser 10 g de terre fine < 2 mm.
— Mettre dans le tube à percoler.
— Mettre au-dessus de la terre un tampon de ouate, et tasser le tout.

(Le tassement de la ouate et de la terre a pour but de réduire la vitesse de filtration de manière que 250 cc Ac. Am. percolent dans un temps compris entre 2 et 20 heures. METSON ajoute quelquefois du sable de quartz dans le but d'accélérer la filtration. Cette addition ne s'est pas révélée nécessaire dans nos manipulations).

— Mettre par série 1 à blanc : ouate, Ac. Am, alcool.., qui servira pour la C. E. et les B. E.

Saturation du sol :

— Relier le tube percolateur à son réservoir sur le banc à percolation, en serrant fortement le bouchon, de manière à ce que la descente de l'Ac. Am ait lieu autant que possible goutte à goutte.
— Verser dans le réservoir 250 cc Ac. Am (METSON 300 cc) et laisser percoler. (Débuter la percolation vers le milieu ou fin d'après-midi).

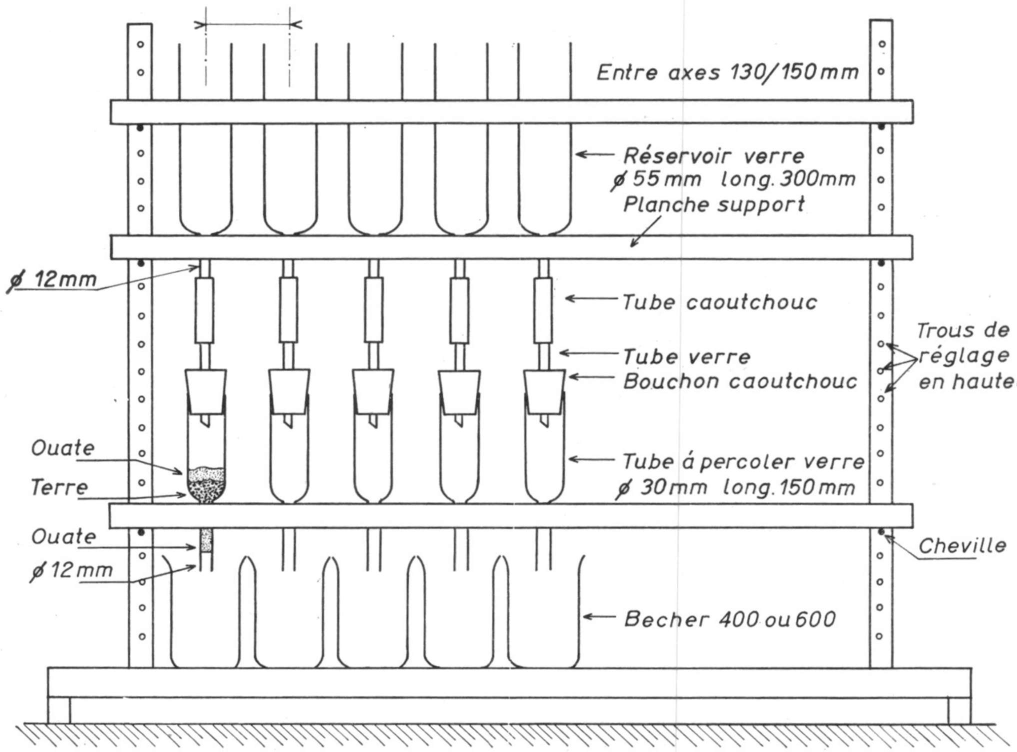


FIG 1. *Banc à percolation.*

Elimination de l'exès d'ammonium :

— Détacher le tube de son réservoir.
— Rincer deux fois le tube par environ 10 cc d'alcool de lavage (à la pissette).
— Après égouttage de ces 20 cc, relier le tube à percoler à un réservoir propre et y verser 200 cc d'alcool de lavage.

(Il est utile d'avoir 2 bancs à percolation dont les réservoirs serviront exclusivement :
1° les uns à contenir l'Ac. Am ;
2° les autres l'alcool.
Ceci évite d'avoir à rincer à chaque série les réservoirs ayant contenu l'Ac. Am).

— Après percolation des 200 cc :
Rincer les tubes par 2 fois 10 cc environ d'alcool à 95° pur.

Déplacement de l'ammonium adsorbé :

— Transférer terre et ouate au moyen d'un agitateur et d'un jet de pissette dans un ballon de 1 litre.
— Ajouter environ une cuillère à café de magnésie calcinée lourde et 1 pois de paraffine, pour éviter la mousse. (volume de liquide total 300 à 400 cc).
— Adapter le ballon à l'appareil à entraînement ;
— Distiller en recevant le distillat dans 50 cc d'acide borique à 4 p. 100 et quelques gouttes d'indicateur mixte.

Chauffer le générateur et le ballon contenant la terre de manière à ce que le liquide à distiller bouille fortement. Son volume doit tendre à réduire et non à s'accroître. Ceci est important d'après METSON, pour assurer un entraînement complet de l'Am. Le tube doit plonger dans l'acide borique. Éviter tout échauffement du distillat (DROUINEAU). L'indicateur vire au bleu-vert dès le début du dégagement d'ammoniaque.

Distiller environ 250 cc et vérifier que le dégagement d'Am est terminé.

Déplacement de l'ammonium « fixé » :

Après léger refroidissement,

— Ajouter 50 cc NaOH sensiblement normale et distiller de nouveau en recevant dans BO_3H_3 (10-15 cc suffisent pour les sols à faible pouvoir fixatif).

Titrage :

Dans les deux cas, titrer par HCl 0,1N jusqu'à virage de l'indicateur au gris.

En utilisant 10 g de sol, le nombre de centimètres cubes d'HCl 0,1N, donne directement la capacité d'échange en m. e. pour 100 g.

Références concernant le Mode Opératoire :

Généralité du procédé : METSON (*loc. cit.*) BARSHAD (*loc. cit*).

Indicateur mixte : MA et ZUAZAGA (1942). Microkjeldahl Determination of N A new indicator and a improved rapid method. *Industr. Engng. Chem.* (Anal) **14**, 280-282.

Emploi de l'acide borique. YUEN et POLLARD, (1953). Determination of N in soils and plant materials. Use of boric acid in the microkjeldahl method. *J. Sci Food. Agric.*, **4**, 490-496.

Titre de l'alcool : BOLL et BAUD. Mémento du chimiste, t. I. p. 511-515. Dunod édit

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE EXCHANGE CAPACITY AND EXCHANGEABLE CATIONS OF NON-CALCAREOUS SOILS

The first part of the study, dealing with the exchange capacity and exchangeable cations of non-calcareous soils (10 p. 100 $CaCO_3$), compares different techniques involving :

1) displacement of exchangeable cations and of exchangeable hydrogen, and addition of these.

2) saturation of the soil with a chosen cation, followed by the displacement and determination of the amount adsorbed.

The determination of exchangeable hydrogen proved to be lacking precision.

Results obtained by the recent methods of JAWORSKY, LIVENS, MEHLICH, METSON, RIEHM and BOWER (the last method used for calcareous soils) were also compared.

The exchange capacities obtained were generally of the same order of magnitude. Nevertheless, the were differences in values and practical advantages and disadvantages between the methods.

The ammonium-acetate method was studied separately, with a view to critical values and to certain objections raised, by reviewing the works of the authors and by using experimental data ; cight points were thus particularly discussed.

The ammonium-acetate method was recogniezd to be suitable for the simultaneous determination of the exchange capacity and of the exchangeable cations in the first percolate. The experimental technique is almost identical with that of Metson used for the first part (normal exchange capacity) and utilises Barshad's technique for the second part (fixed ammonium).

The technique is described in the appendix.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUM STUDIUM DER AUSTAUSCHKAPAZITÄT UND DER AUSTAUSCHBAREN BASEN NICHT KALKHALTIGER BÖDEN.

Der erste Teil dieser Studie besteht in einer Methodenauswahl, welcher der Austauschkapazität und der austauschbaren Basen von « nicht kalkhaltigen Böden » ($CaCO_3 < 10$ p. 100) gewidmet ist.

Zu diesem Zwecke, wurden verschiedene Arbeitsvorschriften, welche zweiar Verfahren angehören, zum Vergleich herangezogen :

— Verdrängung der austauschbaren Basen, der Austauschsäure und Addierung dieser Mengen.
— Bodensättigung durch ein bestimmtes Kation, sodann Verdrängung und Bestimmung der Menge an adsorbiertem Kation.

Die Bestimmung der Austauschsaure erscheint als nicht zuverlässig.

Die erzielten Resultate folgender Methoden wurden verglichen : JAWORSKY, LIVENS, MEHLICH, METSON, RIEHM und BOWER (letztere anwendbar für kalkhaltige Böden).

Die so bestimmten Austauschkapazitätswerte entsprachen im allgemeinen einer selben Grössenordnung. Jedoch verzeichnet man besondere Unterschiede in den erzielten Werten sowie einige praktische Vor-oder Nachteile.

Die Ammoniumazetatmethode wurde getrennt untersucht : der Wert verschiedener Kritiken oder Einwendungen wurde in Betracht gezogen indem man sich die auf Arbeiten verschiedener Autoren berief oder nötigen Versuche ausführte. Auf solche Weise wurden acht besondere Punkte bearbeitet.

Als Verfahren welches es erlaubt, zugleich die Austauschkapazität sowie die Bestimmung der austauschbaren Basen in ersten Auszug zu ermitteln, wurde schliesslich, in ihrem Prinzip, die Ammoniumazetatmethode angewandt.

In ihrer Anwendung, ist die Arbeitsvorschrift des ersten Teiles (normale Austauschkapazität), fast gänzlich diejenige nach METSON. Für den zweiten Teil, ist sie von derjenigen nach BARSHAD (« gebundenes » Ammonium) abgeleitet.

Im Anhang, wird die angewandte Methode angeführt.

Дополнение к изучению обменной способности и обменных оснований бедных кальцием почв.

Петр ЛЕФЭВР (Амьен).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Первая часть работы, посвященная обменной способности и обменным основакиям почв бедных кальцием (один процент Co^3Ca), касалась выбора метода.

С этой целью, были сравнены различные методы, принадлежащие двум группам, к которым онп могут быть причислены :

— Вытеснение обменных оснований, обменного водорода, и прибавление этих количеств.

— Насыщение почвы определенным катионом, после чего вытеснение и определение поглощенного количества этого катиона.

Определение обменного водорода, кажется, мало точно.

Были сравнены результаты полученные применением новых методов : ЯВОРСКИЙ, ЛИВЕНС, МЕЛИХ, МЕТСОН, РИЕМ и БОВЕР (последний применяемый к почвам богатым кальцием).

Величины обменной способности таким образом определенной в общем отличаются мало. Тем не менее следует отметить некоторое неслождение цыфр и преимущества или неудобства практического порядка.

Затем, был изучен отдельно метод уксуснокислого аммония, оценивая основательность сделанных критикований и возражений, или ссылаясь на работы авторов, или производя необходимые опыты. Таким образом, были изучены восемь частных пунктов.

В конечном итоге, метод пользующийся уксуснокислым аммонием как основа был принят как способ позволяющий определять адновременно поглотительную способность и, на первом фильтрате, определять поглощенные основания.

При применении, ход операции почти полностью тот, что указан МЕТСОНОМ для первой части (нормальная поглотительная способность). Он происходит от метода БАРШАДА для второй части (зафиксированный аммоний).

Использованный ход анализа указан в дополнительной главе.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ALLISON F. E., DOETSCH J. H., ROLLER E. M., 1951. Ammonium fixation and availability in Harpster clay loam. *Soil Sci.*, **72**, 187-200.

ALLISON R. E., ROLLER E. M., DOETSCH J. H., 1953. Ammonium fixation and availability in vermiculite. *Soil Sci.*, **75**, 173-180.

ALLISON F. E., DOETSCH J. H., ROLLER E. M., 1953. Availability of fixed ammonium in soils containing différent clay minerals. *Soil Sci.*, **75**, 373-382.

ALLISON F. E., KEFAUVER M. ROLLER E. M., 1953. Ammonium fixation in soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **17**, 107-110.

ALLISON F. E., ROLLER E. M., 1955. A comparison of leaching and distillation procedures for determining fixed ammonium in soils. *Soil Sci.*, **80**,349-362.

AMAVIS R., 1959. Comparaison des méthodes de mesure de la capacité d'échange d'ions d'un sol. Mise au point d'une méthode rapide. *Bull. A. F. E. S.*, **8**, 317-325.

BARBIER G., TENDILLE Cl., TROCME S., 1957. Expérience culturale de onze années sur la fumure potassique. *C. R. Ac. Agric.*, **XLIII**, 256-261.

BARROWS H. L., DROSDOFF M., 1958. A comparison of methods for determining the base-exchange capacity of some soils of the Lower coastal plain of the southeastern United-States. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **22**, 119-122.

BARSHAD I., 1951. Cation exchange in soils. I. Ammonium fixation and its relation to potassium fixation and to determination of ammonium exchange capacity. *Soil Sci.*,**72**, 361-371.

BARSHAD I., 1952. Factors affecting the interlayer expansion of vermiculite and Montmorillonite with organic substances. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **16**, 176-182.

BARSHAD I., 1954. Cation exchange in micaceous minerals. I. Replaceability of the interlayer cations of vermiculite with ammonium and potassium ions. *Soil. Sci.*, **77**, 463-472.

BASTISSE E. M., 1947. Contribution à la détermination du type minéralogique des argiles des sédiments. Sols naturels en place et sols de culture. *Ann. Agron.* 398-454.

BLUME J. M., SMITH D., 1954. Determination of exchangeable calcium and cation exchange capacity by equilibration with 45 Ca. *Soil Sci.*, **77**, 9-17.

BOWER C. A., 1950. Fixation of ammonium in difficulty exchangeable form under moist conditions by some soils of semiarid regions. *Soil Sci.*, **70**, 375-383.

BOWER C. A., TRUOG E., 1940. Base exchange capacity determination as influenced by nature of cation employed and formation of basic exchange salts. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, **5**, 86-89.

BOWER C. A., REITERMEIER R. F., FIREMAN M., 1952. Exchangeable cation analysis of saline and alkali soils. *Soil Sci.*, **73**, 251-261.

BRADFIELD et ALLISON, 1933. *Trans 2nd Comm. Int. Soc. Soil. Sci.* Copenhague Vol. A, **63**, (*in* Piper, 1950).

BRAY et WILHITE, 1929. *Industr. Eng. Chem.*, **1**, 144 (*in* Piper 1950, *in* Brunel, 1948).

BRUNEL, 1948. Traité pratique de chimie végétale. 362 p, Georges Frère, Tourcoing.

CECCONI S., POLESELLO A., Metodi rapidi per la déterminazione della capacite di scambio cationico (CSC) del terreno. *Ann.Sper. Agrar.*, **10**, 127-132 (extrait *Ann. Agronn*, 1956, 809).

CHAMINADE R., 1936. Sur le passage à l'état non échangeable du potassium dans les sols. *C. R. Acad Sci.*, **203**,, 682-684.

CHAMINADE R., 1936. La rétrogradation du potassium dans les sols. *Ann. Agron.*, 818-830.

CHAMINADE R., 1940. Fixation de l'ion NH_4 par les colloïdes argileux des sols sous forme non échangeable. *C. R. Acad. Sci.*, **210**, 264-266.

CHAMINADE R., 1946. Sur une méthode de dosage de l'humus dans les sols. *Ann. Agron.*, 119-132.

CHAMINADE R., DROUINEAU S., 1936. Recherches sur la mécanique chimique des cations échangeables. *Ann. Agron.*, 677-690.

CHAPMAN H. D., KELLEY Q. P., 1930. The determination of the replaceable bases and the base-exchange capacity of soils. *Soil Sci.*, **30**, 391-406.

CORNFIELD A. H., 1952. A rapid copper acetate method for the determination of the base-exchange capacity of soils. *J. Sci.. Food Agric.*, **3**, 388-390. (*in* BLAKEMORE et METSON, 1960. *Soil Sci.* **89**, 20**2-208.)**

DEMOLON A., 1948. Dynamique du sol. 4[e] édition. Dunod, Paris.

GEDROIZ 1918-1919. *Zhur. Opit. Agron.*, 226). *in* Piper, 1950).

GOLDEN L. B., GAMMON N., THOMAS R. P., 1942. A comparison of methods of determining the exchangeable cations and the exchange capacity of Maryland soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **7**, 154-161.

HANWAY J. J., SCOTT A. D., 1956. Ammonium fixation and release in certain Iowa soils. *Soil Sci.*, **82**, 379-386.

HISSINK (Trad. G. BARBIER), 1928. Contribution à l'étude de l'absorption dans le sol. *Ann. Agron.*, 89.

HISSINK 1923. *Soil Sci.* **15**, 269 (*in* Piper 1950).

HISSINK, 1927. Mode opératoire pour la détermination de T-S. (C. R. 2[e] Comm. Assoc. Internation. *Sci. Sol.*, Vol. B., Groningue. (*in* JORET 1934).

HISSINK 1925. Trans. Faraday Soc., **20**, 560. (*in* DEMOLON, 1948. Dynamique du sol. 4[e] éd., 246).

HOLT R. F., 1956. Amperometric titration for cation exchange capacity of soils. *Soil Sci.* **81**, 121-124.

HOLTZINGER K. R., MAC HENRY J. R., RHODES D. W., 1954. A polarographic method for determining the total cation exchange capacity of soils. *Soil Sci.*, **77**, 137-142.

VAN HOVE J., VAN RUYMBEKE M., LEENHEER L., 1956. Étude comparative de différents modes opératoires pour la détermination du degré de saturation en bases. 6[e] *Congr. internation. du Sol,* Paris, Vol. B, 479-484.

ITO M., INAMATSU K., The determination of cation exchange capacity of soils by means of E. D. T. A. *J. Sci. Soil Tokyo*, **25**, 245-248) résumé dans *Soils and Fertilizers*, 1955, 487).

JAWORSKY C. A., STANLEY A., BARBER 1959. Soil properties in relation to potassium uptake by alfalfa. *Soil Sci.* **87**, 37-41.
JORET G., MALTERRE H., CAZABAN, 1934. L'appréciation des besoins en chaux des sols de limon d'après leur état de saturation en bases échangeables. *Ann. Agron.*, 463-479.
KELLEY, (*in* HISSINK). *Ann. Agron.*, 1928, 89.
KELLEY ,1957. Adsorbed Na^{+}, cation exchange capacity and percentage Na saturation of alkali soils. *Soil Sci.*, **84**, 473.
KICK H., 1951. Untersuchungen uber die Wirkung von mineral-und Stalldünger auf die Sorptionskapasität und den Kohlenstoffhaushalt von Ackerböden. *Z. Pflanzenernahr.*, **53**, (98) 97-120.
LAMBERT, WIKLANDER, 1947. Studies on ionic exchange with special reference to the conditions in soils. *Ann. Roy. Agric. Coll. Sweden*, **14**, 1-172.
DE LEENHEER L., 1948. Les propriétés sorptives des sols et leur interprétation minéralogique avec application aux sols argileux des polders marins. *Bull. Soc. Belge Géol.*, **57**, 299-320.
LIVENS P. J., 1954. Degré de saturation d'une séquence de sols forestiers sur limon loessique. 5e Congr. Internation. Sci du Sol, Léopoldville, **2**, 376-383.
VAN DER MAREL H. W., 1950. The determination of the cationic exchange capacity of the inorganic soils particles. 4e Congr. Internation. Sci. du Sol, Amsterdam, **2**, 94-97.
VAN DER MAREL H. W., 1954. The amount of exchangeable cations of K-fixating soils. 5e Congr. Internation. Sci. Sol, Léopoldville, **2**, 300-307.
MEHLICH A., 1942. The significance of percentage base saturation and pH in relation to soil differecnce. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*,**7**, 167-174.
MEHLICH A., 1945. Effect of type of soil colloïd on cation adsorption capacity and on exchangeable Hydrogen and Calcium as measured by differents methods. *Soil Sci.*, **60**, 289.
MEHLICH A., 1948. Determination of cation and anion exchange properties of soils. *Soil Sci.*, **66**, 429.
METSON A. J., 1956. Methods of chemical analysis for soil survey samples. New Zealand Soil bureau. *Bull*, no 12.
MOREL R., 1957. Étude expérimentale des phénomènes d'échange sur différents minéraux argileux. *Ann. Agron.*, 5-89.
MUNIER P., RIVIÈRE A., 1946-1948. Contribution à l'étude des argiles utilisées en céramique. Fasc. I, Fasc. II. Centre National d'Études et Recherches céramiques. Paris.
Official methods of the Association of Official Agricultural Chemists, 1955. 8e éd., A. O. A. C., Washington.
PARKER F. W., 1929. *J. Amer. Soc. Agron.*, **21**, 1030. (*in* Brunel, *in* Piper, p. 196).
PERKINS A. T., 1952. Determination of cation exchange capacity of soils by use of versenate. *Soil Sci.*, **74**, 443-446.
PIERRE, SCARSETH, 1931. Determination of the percentage base saturation of soils and its value in different soils at definite pH values. *Soil Sci.*, **31**, 99-115. (extrait *in* Ann. Agron. 1931, 392.
PIPER C. S., 1950. Soil and plant analysis. Univ. Adelaïde, South Australia.
PRATT P. F., HOLOWAYCHUCK N., 1954. A comparison of ammonium acetate, baryum acetate, and buffered baryum chloride methods of determining cation exchange capacity. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **18**, 365-368.
PURI A. N., 1934. New method of determining base exchange capacity of soils. *Soil Sci.*, **37**, 105-108 (*in* PURI, 1935, no 63).
PURI A. N., 1935. Estimation of replaceable Na and K, exchange capacity and degree of alkalization in Alkali soils by ammonium carbonate extraction. *Soil Sci.*, **40**, 249-253.
PURI A. N., UPPAL H. L., 1939. Base exchange in soils. I. A critical examination of the methods of finding base exchange capacity of soils. *Soil Sci.*, **47**, 245-253
RIEHM ,ULRICH B., ULRICH M .,1954. Schnelle Bestimmung der Kationensorptionkapacität. *Landwirt. Forsch.*, **6**, 2-95.
RUSSELL E. J., RUSSELL E. W., 1953. Soil conditions and plant growth. 8e éd., Longmans, Green et Co., London.
SAWHNEY B., L. JACKSON M. L., COREY R. B., 1959. Cation exchange capacity determinations of soils as influenced by the cation species. *Soil Sci.*, **87**, 243-248.
SCHATSCHABEL P., 1953. Die Bestimmung von S. Wert, T. Wert and Sättigungsgrad. *Z. Pflanzenernah.*, **51**, 7 (*in* VAN HOVE).
SCHOFIELD R. K., 1933. *J. Agric. Sci.*, **23**, 252. (méthode *in* Piper).
SCHOLLENBERGER C. J., DREIBELBIS R. F., 1930. Analytical methods in base exchange investigations on soils. *Soil Sci.*, **30**,161-173.
SHAW W. M., 1949. Determination of exchange hydrogen and lime requirements of soils. *J. A. O. A. C.*, **32**, 437. (extrait *in* Ann. Agron, 1950, 124).
SHAW W. M., MAC INTIRE W. H. 1935. The determination of adsorbed bases by boiling with ammonium chloride and the utility of the proceding in relation to soil investigations. *Soil Sci.*, **39**, 359-375 (*in* GOLDEN).
SIELING H., 1941. Base exchange capacity determinations of soils by means of a rapid colorimetric copper method. *J. Amer. Soc. Agron.*, **33**, 24-36. (extrait Ann. Agron., 1948, 607).
STANFORD S., PIERRE W. H., 1946. Relation of potassium fixation to ammonium fixation. *Soil Sci., Soc. Amer. Proc.*, **11**, 155-160. (résumé *Ann. Agron.*, 1948, 106).
STRASMAN A., QUIDET P., BLANCHET R., 1958. Valeur comparée des divers tests analytiques relatifs au potassium du sol, d'après la réaction des plantes aux engrais potassiques. *C. R. Acad. Agric.*, **44**, 639-642.
SWINDALE L. D., FIELDES M., 1952. Rapid semi micromethod for cation exchange capacity of clays and soils with the flame photometer. *Soil Sci.*, **74**, 287-290.
WILLIAMS R., 1928. *J. Agric. Sci.*, **18**, 439. (*in* Piper, 157).

Ann. agron., 1961, **12**, (2) 207-248.

634. 11 : 581. 14. 051 : 631. 43 (44).

RELATIONS ENTRE LES PROPRIÉTÉS PHYSIQUES DU SOL ET LA CROISSANCE DU POMMIER DANS LA SARTHE

R. GRAS
Avec la collaboration technique de J. OUDARD.

Laboratoire d'Étude des Techniques culturales,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles.

SOMMAIRE

L'utilisation de la méthode du « Profil Cultural » et des techniques statistiques a permis de mettre en évidence les propriétés physiques du sol importantes pour la croissance du pommier : texture, propriétés structurales et leurs conséquences, réserve en eau du sol.

I. — INTRODUCTION

Le développement récent des plantations d'arbres fruitiers a montré que les sols convenaient de façons différentes à la croissance des arbres. Dans le but de définir l'aptitude des sols à la plantation des vergers et les traitements applicables à un sol donné pour en pallier les inconvénients, une étude de la croissance du pommier en fonction de l'état du sol a été entreprise dans le département de la Sarthe. Si nous avons pu dégager un certain nombre d'indications, c'est grâce à l'accueil que nous ont réservé les adhérents du Syndicat d'Arboriculture du Maine, aux observations qu'ils ont bien voulu nous communiquer à et l'aide matérielle qu'ils nous ont apportée. Il nous faut enfin souligner la coopération très amicale et très efficace de Monsieur ANQUEZ, Secrétaire du groupement qui, grâce à sa parfaite connaissance des problèmes locaux a orienté très utilement cette prospection et préparé nos programmes de tournées.

Pour un agriculteur, le sol représente les 20 à 40 cm superficiels atteints par la charrue, de toute évidence cette définition est insuffisante pour caractériser le milieu en tant que support d'une verger puisque les racines des arbres descendent beaucoup plus profondément. Nous appellerons sol l'épaisseur de terre exploitée par les racines des arbres. Cette épaisseur peut-être très différente selon les conditions du milieu et varier de 30 à 150 cm. Dans la plupart des cas la totalité de l'enracinement se trouve dans la couche de sol de 1 m d'épaisseur.

Nous indiquerons d'abord la méthode de travail utilisée pour l'étude simultanée du sol, de l'enracinement et des parties aériennes de l'arbre. Ensuite, dans une première partie, on analysera l'influence sur la vigueur des différentes caractéristiques

du sol : texture (ou granulométrie), propriétés structurales, régime de l'eau, calcaire, propriétés hydriques. Les propriétés chimiques du sol et l'influence des divers facteurs physiques sur le rendement seront ensuite brièvement traitées. Nous arriverons enfin à la nécessité de la synthèse de toutes les caractéristiques du sol, qui se réalise après l'examen du profil et nous envisagerons sommairement l'incidence du sol sur la plantation d'un verger.

II. — MÉTHODES DE TRAVAIL

Pour résoudre ce problème des aptitudes du sol il faut définir l'état du sol, le mécanisme d'action du terrain sur les racines et enfin la vigueur de l'arbre.

A. *Etude du sol.*

Les critères déjà existant de définition du sol sont nettement insuffisants. La granulométrie ne rend pas compte de toutes les propriétés et par ailleurs on se trouve souvent pour un même profil en présence d'horizons de textures différentes. La définition pédologique est déjà plus satisfaisante, mais elle ne permet pas en particulier de rendre compte des intéractions entre couches. Ceci nous a conduit à employer la méthode du profil cultural (S. HENIN et coll. 1960) qui est l'ensemble constitué par le profil pédologique, modifié par la culture, et le système radiculaire des végétaux. L'examen du profil cultural se fait sur une tranchée creusée à une distance de 60-80 cm du tronc. Sur la paroi de cette tranchée on examine la constitution du sol, la texture et la structure des différents horizons. On note soigneusement l'état de la matière organique et les traces laissées par le travail du sol. La stabilité de la structure est évaluée au laboratoire au moyen de deux tests (S. HENIN, G. MONNIER et coll. 1958) : tamisage sous l'eau d'agrégats calibrés donnant l'indice S et mesure de la perméabilité sur échantillons remaniés donnant l'indice K.

B. *Examen du système radiculaire.*

Il fait partie intégrante de l'étude du profil cultural, car c'est le comportement des racines qui permet d'apprécier l'influence de l'état du sol, de comparer les divers horizons du profil et de mettre en évidence les facteurs favorables ou défavorables. La racine constitue à cet égard le meilleur test pour l'évaluation des qualités du sol. On examine la répartition des racines dans les divers horizons, leur trajet par rapport aux accidents du profil, leur orientation et leur état sanitaire.

Il faut remarquer que si l'examen d'une tranchée à proximité du tronc permet de tester le comportement des racines vis-à-vis des différentes propriétés du sol, cette méthode est insuffisante pour avoir une connaissance complète du système radiculaire. Cette dernière nécessiterait une mise à jour de l'ensemble des racines, opération qui demande plusieurs semaines. La méthode que nous utilisons consiste à réaliser pour chaque arbre, à distance sensiblement constante du tronc « une coupe » dans l'enracinement et à multiplier les observations de ce genre. On peut ainsi obtenir en nombre important des observations ou des mesures comparables entre elles.

C. *Appréciation de la vigueur de l'arbre.*

Les études précédentes ne seraient pas complètes si l'on ne testait pas la valeur du syndrome précédent sur le comportement des parties aériennes de l'arbre. Le meilleur indice serait évidemment le rendement cumulé de l'arbre pendant une période donnée. Malheureusement ce rendement n'est pas connu pour chaque sujet. Aussi faut-il utiliser un critère plus facilement abordable. On songe aussitôt à l'aspect général de l'arbre, qui caractérise la vigueur. L'appréciation de la vigueur d'un arbre donné en végétation se fait facilement dans les cas extrêmes par comparaison d'arbres voisins de même âge, sous réserve que les arbres présentent des différences de vigueur aisément appréciables. La comparaison s'avère plus difficile lorsque les vigueurs sont similaires et elle devient très délicate lorsque les arbres n'appartiennent pas au même verger. Ceci montre l'intérêt d'un critère quantitatif, facile à utiliser en toute circonstance. La longueur de la circonférence du tronc est à cet égard convenable, car elle dépend à un âge donné de l'action sur le végétal de tous les facteurs ayant joué depuis la plantation ; cette quantité présente en outre l'avantage d'être en bonne corrélation avec le rendement (von NEUMANN D. 1958 et annexe 2).

Mais les longueurs de circonférences du tronc sont une fonction croissante de l'âge de plantation et l'on est parfois amené à comparer des arbres d'âge différent, ou même simplement à déterminer si un arbre donné a une croissance normale. On voit ainsi apparaître la nécessité d'un système de références pouvant permettre un classement plus objectif en fonction de l'âge de l'arbre. La construction de la courbe *moyenne* représentant les variations de la circonférence du tronc en

fonction du temps répond à ce besoin. Si l'on porte sur un graphique les points représentatifs des couples circonférence-âge, on obtient un nuage de points. La courbe moyenne qui passe au milieu de ce nuage représente la croissance moyenne dans les conditions de culture actuelle de la Sarthe. Les points situés au-dessus de la courbe correspondent à des arbres plus vigoureux que la moyenne, tandis que c'est l'inverse pour les points situés en dessous de la courbe. La forme de cette courbe étant inconnue à priori on en a déterminé l'allure approchée en l'assimilant à une ligne brisée (fig. 1), l'équation de chaque segment étant déterminée par la méthode des « moindres carrés ». Cette méthode

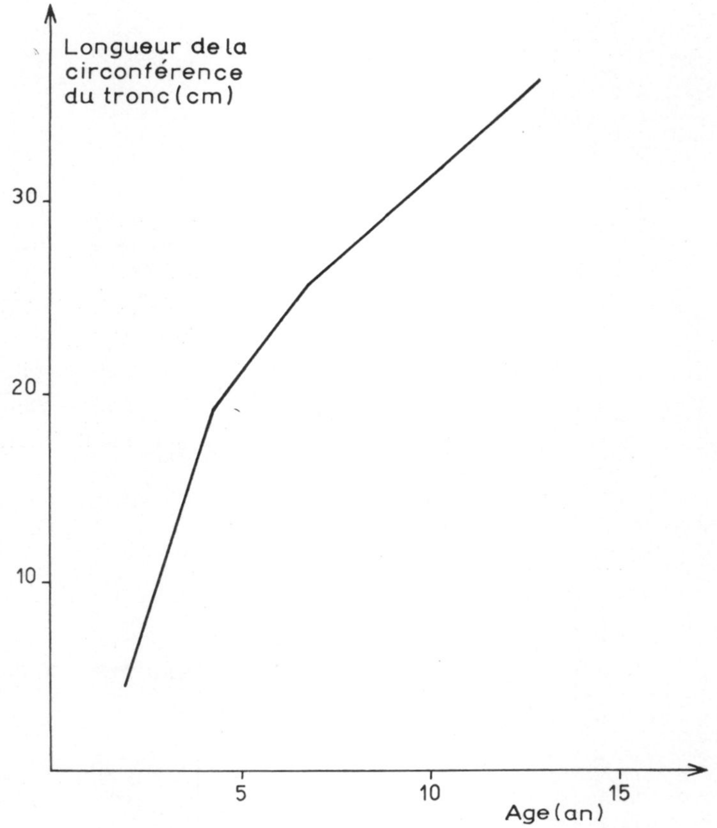


FIG. 1. — *Allure approchée de la courbe de croissance du tronc.*

ne nécessite aucune hypothèse sur la distribution de la population de circonférences. Une fois le premier ajustement obtenu, l'utilisation des points de cette première courbe a permis de constater que la courbe moyenne circonférence du tronc — âge de plantation était susceptible d'un ajustement logarithmique. Ceci a permis de calculer les équations de régression linéaire y-log t :

y = longueur de la circonférence du tronc (cm)
t = âge de plantation (année)

$y = 54{,}00 \log t - 12{,}89$ forme libre
$y = 33{,}21 \log t - 3{,}24$ forme palissée.

Deux courbes ont été construites (fig. 2). L'une est relative aux arbres conduits en forme libre dont la totalité est constituée de Reinettes du Mans greffées sur franc. Elle est valable dans l'intervalle, 3-80 ans. L'autre courbe qui est relative à des arbres conduits en forme palissée a été établie à l'aide de sujets de variétés diverses greffés sur doucin. Elle ne concerne pas les arbres greffés sur EM IX, porte-greffe nanifiant, et est valable entre 2 et 16 ans.

Pour ce qui est du choix des arbres à étudier on opère souvent ainsi : à l'intérieur d'un même verger homogène au point de vue matériel végétal et âge de plantation les observations sont faites

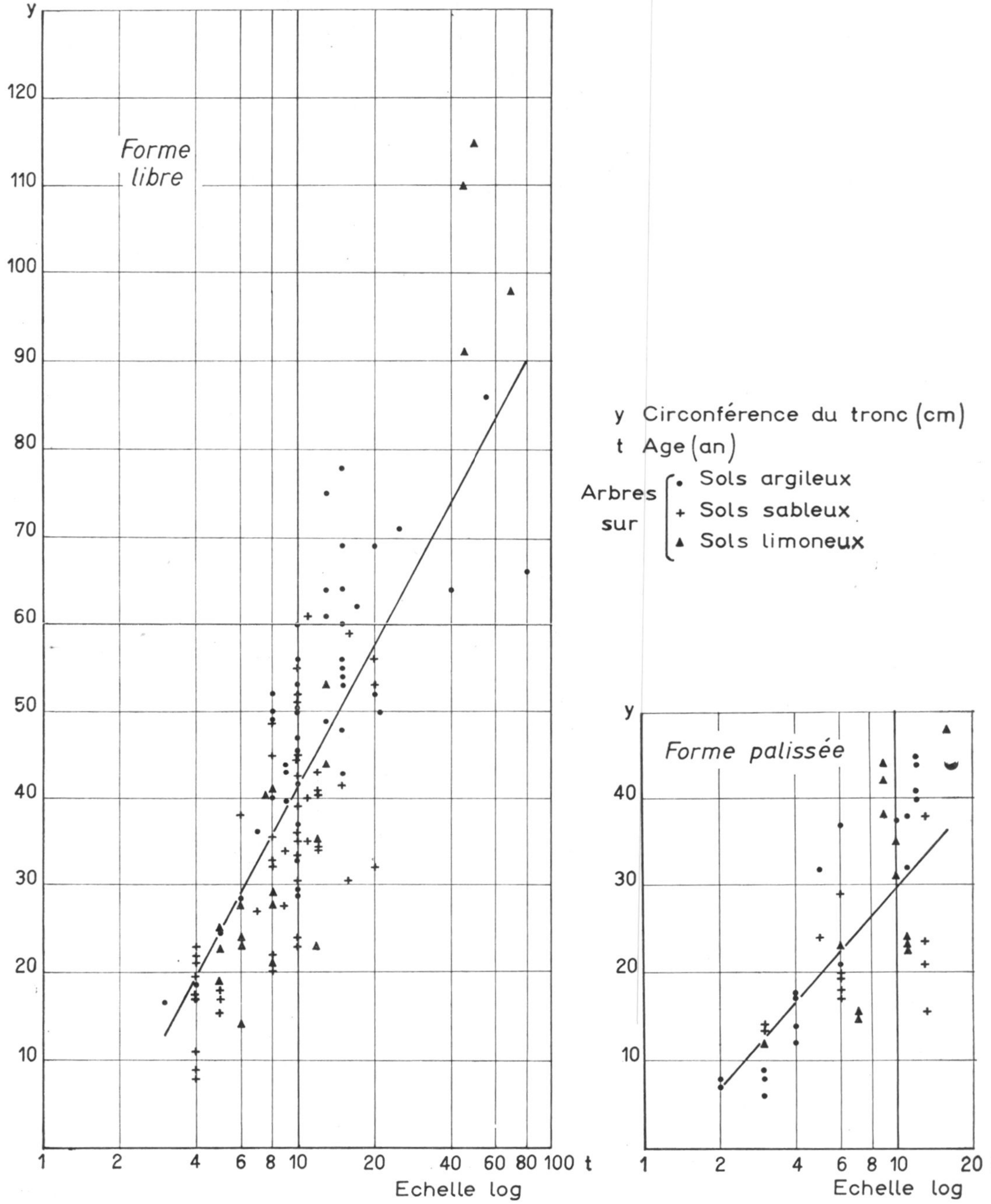


FIG. 2. — *Croissance des arbres poussant sur divers types de sol.*

sur deux arbres présentant des vigueurs très différentes. On se place ainsi dans les meilleures conditions pour observer les facteurs du sol dans leurs états d'intensité extrême.

La méthode employée a permis d'étudier dans les vergers existants un grand nombre de situations qu'il eut été impossible de reconstituer expérimentalement. Par contre, l'absence de conditions d'observation bien définies (hétérogénéité des porte-greffes, de l'entretien des vergers etc...) nécessite un contrôle statistique, qu'il s'agisse de différencier le comportement d'arbres poussants sur des sols différents ou d'examiner à l'intérieur d'une même population de sols l'influence d'un facteur.

La méthode peut se résumer comme l'emploi systématique de l'examen du profil cultural dans les vergers, conjugué avec une interprétation statistique des observations qualitatives et quantitatives. Elle présente un intérêt particulier dans le cas des plantes pérennes du fait de l'action cumulative du sol sur le système radiculaire et de la moindre importance du travail du sol qui est un des facteurs de la réussite des plantes annuelles.

III. — CARACTÉRISTIQUES DES VERGERS ÉTUDIÉS

Les observations ont été effectuées dans des vergers situés dans la Sarthe et le nord de l'Indre et Loire. Une proportion importante de ces vergers se trouve dans la région de Chateau du Loir, mais des observations ont également été faites dans les régions de la Flèche, près de Saint-Paterne en Indre-et-Loire, dans la région du Mans et au nord-nord-est de cette ville.

Les arbres sont conduits soit en forme libre : haute tige, basse tige (buisson américain) ou demi-tige, soit en forme palissée. Nous engloberons dans cette dernière catégorie les haies fruitières.

Les distances de plantation les plus fréquentes varient entre 7,5 et 11 m pour les formes libres. Dans le cas des formes palissées les distances sur les lignes varient entre 2 et 4 m tandis que les écartements des lignes vont de 3 à 5 m.

Les âges des vergers s'échelonnent entre 2 et 19 ans pour les formes palissées et 4 et 80 ans pour les formes libres.

Les porte-greffes utilisés sont dans la plupart des cas des doucins pour les formes palissées, tandis que la quasi totalité des formes libres sont greffées sur franc. Nous verrons d'ailleurs que l'hétérogénéité de ce dernier matériel végétal n'a pas empêché la mise en évidence de l'action du sol.

La plupart des arbres ont été plantés sans labour profond du sol. Il y a eu quelquefois un labour superficiel. Dans la majorité des cas il y a eu seulement creusement d'un trou de plantation avec ou sans sous-solage préalable.

IV. — LA TEXTURE

Cette propriété résulte de la dimension des particules élémentaires constituant le sol, chaque sol étant le plus fréquemment fait de particules de diamètres différents. Ceci conduit à considérer des fractions granulométriques, pourcentages pondéraux des particules comprises entre deux diamètres déterminés. L'importance de chaque fraction dépend surtout de ses propriétés physiques et physico-chimiques ; l'argile par exemple présente une absorption de l'eau et des éléments fertilisants et un pouvoir ciment importants. Ceci justifie que l'on qualifie par la suite d'argileux un sol où la fraction argileuse n'est pas dominante. Nous distinguerons alors :

— la texture argileuse qui comporte au moins 25 p. 100 d'éléments de diamètre compris entre 0 et 2 μ.

— la texture limoneuse qui à l'exclusion du caractère précédent comporte 30 p. 100 au moins de particules de diamètre 2 — 50 μ.

— la texture sableuse ne présentant aucune des deux caractéristiques précédentes et ayant une teneur dominante en particules 50 — 2 000 μ.

Fréquemment, on trouve sur un même profil des couches de textures différentes, couche sableuse reposant sur une couche argileuse par exemple. Ceci complique l'appréciation de l'action de la texture sur la croissance de l'arbre, mais permet par contre de comparer les réactions des racines dans des horizons de textures différentes.

A. *Les sols sableux*

Leur profil se présente sous deux aspects. Les sols peu évolués ont sensiblement la même couleur sur toute leur épaisseur, excepté pour l'horizon de surface qui est légèrement grisâtre. Certains sols sableux évolués, appelés podzols, sont constitués de couches différentes :

— horizon de surface A1, gris foncé, riche en matière organique
— horizon lessivé A2, blanc, de consistance cendreuse
— horizon d'accumulation organique B1, brun
— horizon rouille B2, d'accumulation ferrugineuse

Ces deux dernières couches peuvent être durcies.



Enracinement superficiel dans un sable. Ces racines se développent parallèlement à la surface du sol.

a) *Sols peu évolués.*

Ils se présentent avec des structures fort différentes. Les grains de sable peuvent être mobiles les uns par rapport aux autres ; on a alors un sol meuble de structure monoparticulaire. Le sol peut également se présenter comme un bloc unique assez cohérent, on a alors une structure massive ou continue plus ou moins fragile fréquente dans les sables fins. Ces derniers cas assez nombreux montrent que les sols légers ne sont pas toujours aussi meubles que l'on pouvait le croire.

L'exploitation du sol par les racines se ressent de ces mauvaises propriétés physiques ; c'est ainsi que sur 35 observations on note 9 enracinements anormaux (25,6 p. 100) qui se répartissent ainsi :

7 enracinements superficiels de profondeur inférieure à 30 cm, la profondeur étant celle mesurée sur une tranchée creusée à 60-80 cm du tronc.

2 trajets de racines dans des galeries de vers de terre ou de vieilles racines décomposées.

Il faut noter une tendance générale à l'enracinement superficiel même dans les sables meubles. Cette mauvaise exploitation des sables peut avoir des causes multiples et notamment une pauvreté en éléments nutritifs. Cependant, certains auteurs (HIDDING A. P. et Van den BERG C. 1960) relient cette exploitation à une porosité insuffisante de certains sables.

Si l'on considère la vigueur de l'arbre, la présence en profondeur d'une couche légèrement plus lourde est un facteur favorable. Il existe en effet une liaison entre la présence d'un horizon plus lourd (de 11 à 33 p. 100 d'argile) et la vigueur de l'arbre. Ceci a été montré sur un ensemble de 24 sols ayant un horizon superficiel sableux épais de 60 cm au moins. Pour cela on a dressé une table de contingence entre la vigueur de l'arbre notée + ou — et la présence (+) et l'absence (—) d'argile. La probabilité de liaison évaluée à l'aide du test χ^2 passe de 90 p. 100 si l'on considère la présence d'un horizon plus lourd entre 60 et 120 cm, à 95 p. 100 si l'on restreint l'intervalle à 60 — 100 cm.

Ceci tend à montrer que la couche plus lourde ne doit être pas trop profonde pour être efficace. BARBIER G. et coll. (1949) signalent des observations analogues pour sols sur sable de Fontainebleau. Il convient de noter que dans beaucoup de cas où la vigueur ne peut être attribuée à l'argile, les horizons humifères de surface sont plus épais.

b) *Podzols.*

La totalité de l'enracinement est localisée dans les horizons riches en matière organique et meubles. Les racines sont presque totalement absentes de l'horizon blanchâtre lessivé A2 et de ceux des horizons organiques ou ferrugineux profonds qui sont durcis. L'épaisseur variable des divers horizons affecte la vigueur de l'arbre comme le montre le tableau suivant relatif à des corrélations entre la circonférence du tronc d'arbre greffé sur franc et âgé de 10 ans et l'épaisseur de certains horizons :

Cœfficient de corrélation totale *r* entre la longueur de la circonférence du tronc et :	Seuil auquel *r* est différent de 0 (%)	Fraction (%) de la variabilité de la circonférence expliquée par la liaison
épaisseur horizon humifère A1 : + 0,832	0,05	69
épaisseur horizon lessivé A2 : — 0,499	0,30	24
$\frac{\text{épaisseur A1}}{\text{épaisseur A1 + épaisseur A2}}$: + 0,804	0,05	64

On constate ainsi une action très favorable de l'horizon humifère A1 tandis que l'horizon lessivé A2 est défavorable.

B. *Les sols limoneux*

Ces sols ont une teneur importante en particules comprises entre 2 et 50 μ et présentent un toucher de talc. Leur structure est la plupart du temps massive ou continue, c'est-à-dire dépourvue de fissures ; ceci entraîne l'existence d'une faible porosité ce qui explique la sensibilité de ces sols à l'excès d'eau. Leur stabilité médiocre leur confère un caractère battant qui se traduit par un aspect glacé de la surface et des soles de labour nettes et fréquentes.

Ils sont en général bien exploités par les racines. Cependant, on a observé des trajets anormaux de racines qui se « réfléchissent » en quelque sorte sur les parois des trous de plantation. Ces accidents peuvent provenir soit d'un lissage des parois du trou lors de son creusement, soit d'un glaçage par la pluie. On note aussi les exploitations superficielles du sol (moins de 30 cm) dans 4 cas sur 29 (14.2 p. 100).

L'exploitation en profondeur du sol peut être limitée par la présence de lits de cailloux cimentés par des oxydes de fer ou de manganèse ou par l'agglomération par ces mêmes oxydes de concrétions ferrugineuses.

La présence de matières organiques est un facteur favorable dans les sols sains comme le montrent ces observations : établissement des racines dans les horizons humifères enfouis lors de la plantation, prolifération des radicelles au niveau des feuilles enterrées par un labour.

La vigueur des arbres est très inégale en sol de limon et les remplacements d'arbres jeunes y sont plus fréquents que dans les autres types de sol. Souvent ces accidents peuvent être attribués à un engorgement par l'eau comme nous le verrons ultérieurement, mais parfois il est plus difficile de leur attribuer une cause précise.

C. *Les sols argileux*

La plupart des sols de ce type rencontrés dans la Sarthe ont une structure fragmentaire avec des éléments structuraux de faible dimension. Cependant, certains ont une structure continue analogue à celle des limons.

En général, les racines exploitent très bien les sols argileux sauf dans le cas de structures continues qui sont peu ou mal exploitées. Sur 30 observations prises en considération on note un enracinement traçant et deux exploitations nulles, soit 10 p. 100 de mauvais enracinement.

En 1958, année exceptionnellement humide, des phénomènes d'asphyxie très graves sont apparus dans les sols présentant une structure en place convenable. Nous examinerons ces accidents par la suite.

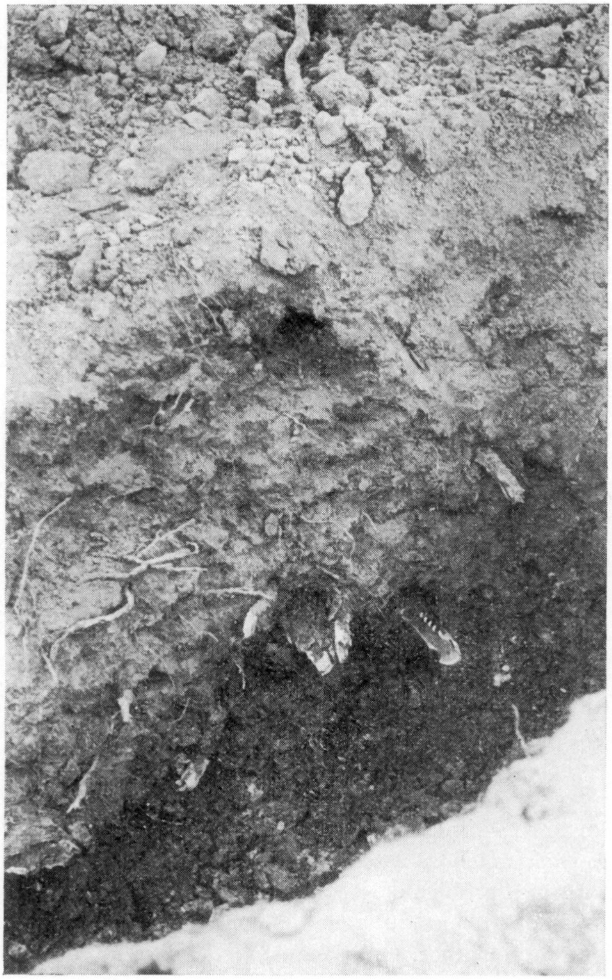
D. *Comparaison entre les diverses textures*

Les textures agissent sur le développement du système radiculaire, ce qui se traduit par une différence de vigueur des parties aériennes.

a) *Action sur l'enracinement.*

De nombreux sols sont constitués d'horizons plus légers (sableux, limoneux ou sableux limoneux) recouvrant un horizon argileux. De telles situations permettent une comparaison intéressante entre l'exploitation des divers horizons par les racines d'un même arbre.

Lorsqu'on a une couche sableuse recouvrant une couche argileuse bien structurée, même profonde (60 cm), c'est cette dernière couche qui est la plus exploitée par les racines et l'enracinement est beaucoup plus profond que si le sol était sableux en totalité. Les racines sont plus grosses et plus ramifiées dans l'argile que dans le sable. Des observations analogues ont été faites par BOYNTON (1938).



Bon enracinement en sol argileux: Une grande épaisseur de sol est exploitée par les racines.

On observe les mêmes faits lorsque c'est le sol limoneux qui recouvre une couche argileuse.

Si l'on considére la profondeur maxima d'enracinement notée sur une coupe dans le cas des sols homogènes, elle est beaucoup plus importante pour les argiles que pour les sables, les limons ayant une position intermédiaire. Par exemple, pour des pommiers de 10 ans greffés sur franc et conduits en plein vent, la différence moyenne de profondeur d'enracinement est de 19,2 cm entre le sable et l'argile ; cette différence est significative au seuil 0,10.

Du point de vue de la forme générale du système radiculaire, il semble que l'on puisse schématiquement distinguer les catégories suivantes (fig. 3). Dans un sable la majorité des racines a une direction sensiblement parallèle à la surface du sol et ce trouve à moins de 50 cm de profondeur. Il peut exister sous le collet quelques racines ayant une trajectoire oblique. Dans certains cas particuliers (podzols) on peut avoir 2 nappes de racines parallèles à la surface du sol. Pour les argiles et les limons à bonnes propriétés physiques les racines abondamment ramifiées sont légérement inclinées par rapport à la surface du sol et la profondeur moyenne de sol exploité est beaucoup plus importante et atteint au moins 1 m. Le système radiculaire dans ce dernier cas est beaucoup plus compact que dans les sables ou l'extension latérale est plus grande.

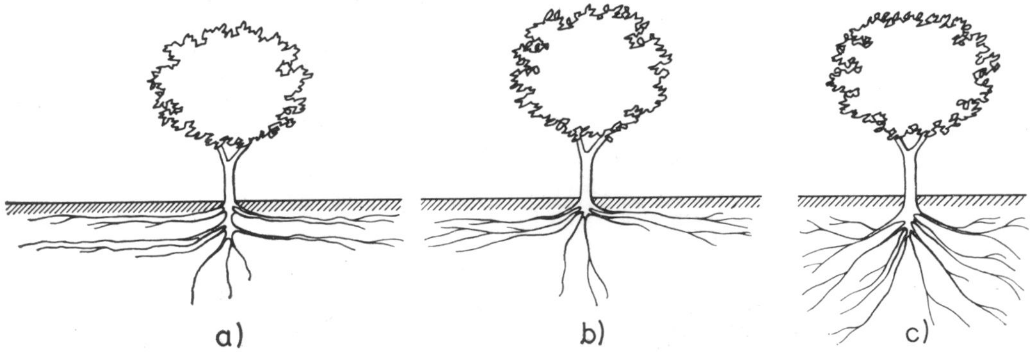


FIG. 3. — *Forme générale des systèmes radiculaires.*
a) enracinement en 2 nappes en sol podzolique.
b) sol sableux.
c) sol argileux bien structuré.

b) *Action sur la vigueur de l'arbre.*

L'effet améliorant de la présence d'argile est mis en évidence par les quelques observations suivantes :

— dans un verger à sol limoneux en surface les arbres vigoureux se trouvent dans les zones où la couche d'argile est à faible profondeur.

— pour les arbres greffés sur franc de 23 ans d'âge, la présence d'une argile peu profonde sous un sable améliore nettement la croissance des arbres.

On peut aborder ce problème de comparaison quantitativement en considérant les longueurs des circonférences du tronc qui sont un indice de la vigueur et en utilisant les courbes de croissance. On place sur le graphique de croissance moyenne les points représentant les longueurs de la circonférence du tronc y et les logarithmes des âges correspondants t pour différents sols (fig. 2 a b). Comme les sols sont la plupart du temps constitués de plusieurs couches, nous avons regroupé dans la même catégorie les sols homogènes constitués sur toute leur épaisseur par des éléments de même texture et ceux dont plus de la moitié de l'épaisseur sur 1 m présente cette texture. Par exemple, un sol comprenant 20 cm de sable reposant sur 80 cm d'argile sera considéré comme argileux. L'examen du graphique montre les faits suivants aussi bien pour les arbres conduits en forme libre qu'en forme palissée :

— groupement des sols sableux au-dessous de la droite de régression moyenne
— situation des sols argileux au-dessus de la droite

— dispersion importante des points relatifs aux sols limoneux de part et d'autre de cette même droite.

Il est possible de vérifier que certaines des différences de comportement mises en évidence sur ce graphique sont significatives. Pour cela on construit des droites de regression *y* — *log t* relatives aux arbres poussant sur les différents sols. Si l'échantillonnage est correct, ces droites se coupent en un même point voisin de l'origine et ne diffèrent que par leur pente. Il s'agit donc de déterminer si les coefficients angulaires sont significativement différents. Pour les arbres conduits en forme libre les difficultés d'échantillonnage ont conduit à se limiter à l'intervalle 8 — 40 ans et la comparaison est possible seulement entre argile et sable. Le coefficient angulaire de la droite relative aux sols argileux est plus grand que celui de la droite des sols sableux au seuil 0,01 (fig. 4). Pour les formes palissées les trois droites se coupent sensiblement au même point et les coefficients angulaires sont de plus en plus grands

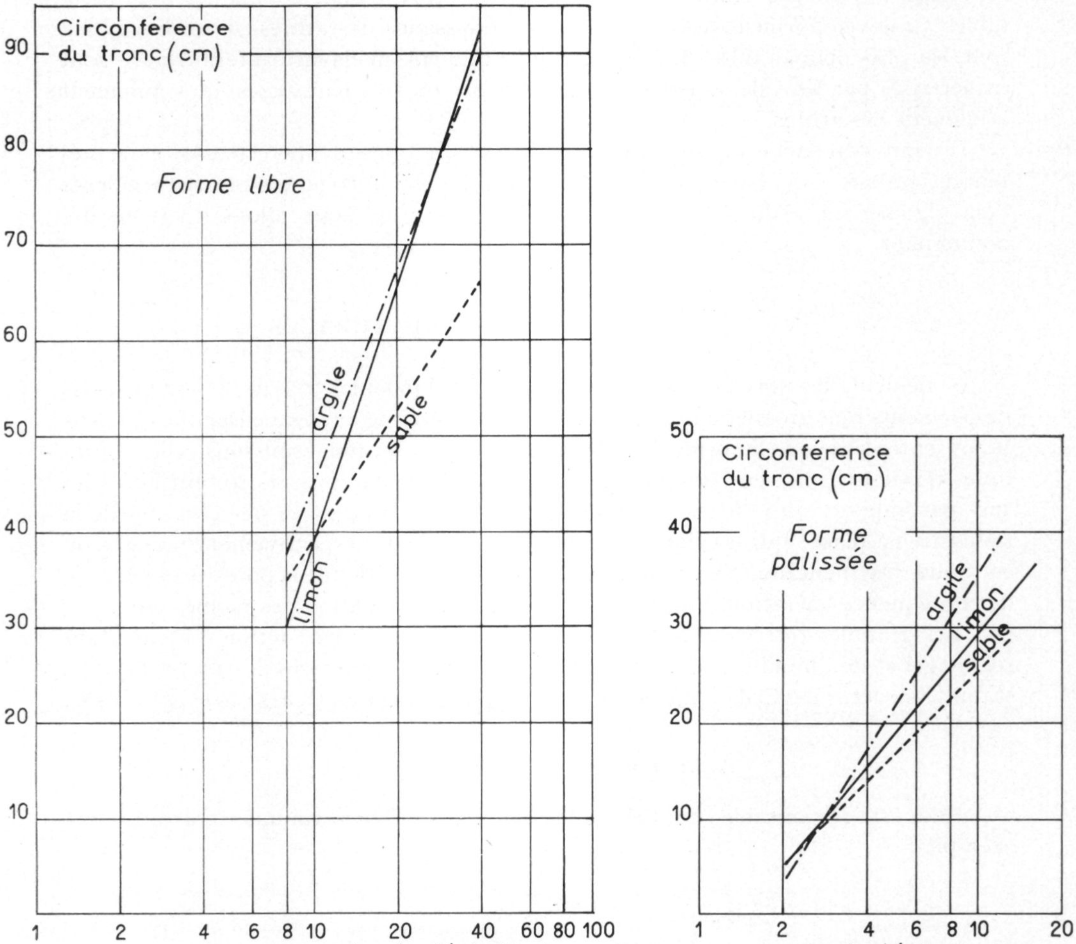


FIG. 4. — *Courbes de croissance moyenne des arbres poussant sur différents sols.*

lorsqu'on passe du sable au limon, puis à l'argile ; (fig. 4). La pente de la droite représentant la croissance des troncs des arbres poussant sur sol argileux est significativement plus grande (seuil 0,02) que celle relative au sable. Il n'est pas possible de différencier la droite afférente au limon de celle de l'argile et de celle du sable (seuil 0,40).

Ainsi les sols argileux à bonne structure (1) apparaissent comme les plus favorables au développement des racines et à la croissance des arbres ; les sols sableux sont les plus défavorables. Les limons qui occupent une place intermédiaire sont caractérisés par les valeurs extrêmes, très bonnes ou très mauvaises, qu'y prennent la vigueur des arbres.

En fait, ces conclusions sont seulement le résultat d'une première analyse et ne présentent qu'une valeur générale. L'explication des cas particuliers ou des accidents déjà signalés nécessite l'étude d'autres facteurs, que nous allons entreprendre maintenant.

V. — LES PROPRIÉTÉS STRUCTURALES

Les éléments les plus fins du sol (argile et humus) jouent le rôle de ciment vis-à-vis des éléments plus grossiers (limon et sable). Il se constitue ainsi un ensemble qui peut se présenter soit sous la forme d'une masse cimentée continue, soit sous celle de granules terreux. Enfin, en l'absence de ciment les éléments grossiers restent libres les uns par rapport aux autres. Ces aspects du sol constituent ce que l'on appelle la structure en place, qui est dans les exemples précédents respectivement massive ou continue, fragmentaire et particulaire. La structure conditionne la porosité et par voie de conséquence l'aération, l'infiltration de l'eau, la pénétration des racines etc...

Les granules terreux ainsi formés peuvent se détruire sous l'action du travail du sol, du gel et de l'humidité. La résistance des agrégats à ces actions destructrices est la stabilité structurale. Celle-ci s'évalue au moyen de deux tests (S. HENIN et coll, 1958).

A. *Action de la structure en place*

Elle est responsable de l'exploitation des horizons comme le montre cet exemple :

Horizon	Exploitation de l'horizon par les racines	Structure en place	Log 10 S	Log 10 K
0-15 cm.............	moyenne	grumeleuse	1,38	1,62
15-22 cm.............	nulle	continue à faiblement polyédrique	1,63	1,26
22-30 cm.............	bonne	grumeleuse faible	1,43	1,58
30....................	nulle	continue	1,86	1,11

Les horizons à structure fragmentaire (grumeleuse) sont bien exploités par les racines tandis que ceux à structure massive ne le sont pas.

(1) L'échantillon des sols argileux comprend essentiellement des sols de structure fragmentaire à petits éléments.

Dans les cas intermédiaires une structure en place médiocre se traduit par une exploitation inégale du sol et par un aspect traçant de l'enracinement qui semble avoir des difficultés à pénétrer dans la zone mal structurée :

Horizon	Exploitation de l'horizon par les racines	Structure en place	Log 10 S	Log 10 K
0-20 cm.............	moyenne	grumeleuse en surface devenant polyédrique en profondeur	1,36	1,38
20....................	médiocre racines contournant les mottes	continue à faiblement polyédrique	1,50	1,27

L'importance relative pour un profil donné des horizons bien et mal structurés commande par l'intermédiaire de l'enracinement la vigueur de l'arbre comme on le voit sur l'exemple suivant (pommier Richared greffé sur franc, âgé de 10 ans, plein vent) :

Profil 1: circonférence moyenne du tronc : 52 cm. Épaisseur de profil exploité : 80 cm		
0 — 20 structure grumeleuse bonne....................	1,02	1,95
20..... structure prismatique fine se résolvant en éléments de 1 cm de côté environ	1,19	1,52
Profil 2: circonférence moyenne du tronc 35 cm. Epaisseur du profil exploité : 50 cm.		
0 — 15 structure grumeleuse bonne....................	0,62	1,94
15 — 50 structure *continue*, taches de rouille............	1,02	1,79
50..... structure prismatique fine	1,30	1,58
Profil 3: circonférence moyenne du tronc 29 cm. Épaisseur de profil exploité : 40 cm.		
0 — 20 structure monoparticulaire	1,16	1,92
20 — 40 structure *continue*, taches de rouille............	1,39	1,72
40.... .structure continue à faiblement polyédrique......	1,33	1,70

L'exemple précédent montre que la structure en place permet de différencier parmi les sols argileux, ceux qui sont exploitables par les racines (structure fragmentaire à petits éléments), de ceux qui ne le sont pas (structure continue).

Ainsi la structure en place commande dans une large mesure l'exploitation des horizons par les racines.

B. Influence de la stabilité structurale

On sait que cette stabilité est étudiée normalement à l'aide des deux indices S et K. L'indice S de destruction des agrégats perd beaucoup de son intérêt pour les sols à texture sableuse où l'agrégation est faible. Par contre, l'indice K est intéressant pour ces derniers types de sol. Ceci nous a conduit à séparer les sols sableux des sols lourds.

a) *Sols lourds.* — Ils contiennent plus de 20 p. 100 de particules 0-2 μ. On a rangé les indices de stabilité dans l'ordre des valeurs croissantes, c'est-à-dire dans l'ordre des stabilités décroissantes (tableau 1). En examinant le comportement des racines on peut faire trois classes :

— l'une des classes extrêmes avec des log 10 S compris entre 0,14 et 1,32 et une valeur moyenne de 1,06 correspond à une bonne exploitation des horizons dans 100 p. 100 des cas.

TABLEAU I

Stabilité structurale et exploitation des horizons
Sols argileux. Classement par log 10 S croissant

Profils	Profondeur (cm)	Teneur éléments 0-2 μ	Log 10 S	Comportement	Classe
1	0 — 10	—	0,14	Exploitation bonne	Bonne exploitation dans 100% des cas
2	60	49,2	0,97	Exploitation bonne	
3	0 — 10	21,4	1,02	Exploitation bonne	
4	40	22,7	1,02	Exploitation bonne	
5	30	—	1,14	Exploitarion bonne	
6	60	33,3	1,15	Bien exploité, pas d'asphyxie malgré un mulch	
7	0 — 10	27,2	1,16	Bien exploité, pas d'asphyxie malgré un mulch	
8	75	—	1,17	Exploitation bonne	
9	55	—	1,19	Exploitation bonne	
10	50	—	1,24	Exploitation bonne	
11	60	—	1,30	Exploitation bonne	
12	60	—	1,32	Exploitation bonne	
13	65	—	1,33	Bien exploité. Asphyxie partielle en 1958	Asphyxie ou - exploitation faible dans 77,8% des cas
14	0 — 10	29,5	1,36	Bien exploité	
15	65	—	1,37	Bien exploité	
16	55	48,5	1,39	Bien exploité, asphyxie totale en 1958	
17	35	25,8	1,39	Bien exploité, asphyxie partielle en 1958	
18	80	27,1	1,40	Bien exploité. asphyxie partielle en 1958	
19	70	—	1,40	Exploitation nulle	
20	60	47,0	1,40	Exploitation faible	
21	—	—	1,41	Mal exploité, asphyxie partielle en 1960	
22	60	44,4	1,43	Bien exploité	
23	40	20,2	1,43	Bien exploité, asphyxie totale en 1958	
24	35	20,2	1,48	Exploitation faible	
25	50	37,5	1,50	Exploitation faible, asphyxie partielle en 1958	
26	40	44,4	1,51	Bien exploité	
27	40	32,1	1,52	Bien exploité, asphyxie partielle en 1958	
28	60	—	1,53	Mal exploité	
29	60	—	1,53	Mal exploité	
30	60	27,6	1,56	Bien exploité, asphyxie partielle en 1958	
31	65	35,4	1,56	Bien exploité, asphyxie partielle en 1958	
32	65	56,0	1,58	Bien exploité, asphyxie totale en 1958	
33	80	—	1,62	Exploitation nulle	Exploitation nulle ou faible dans 87,5% des cas
34	15	23,6	1,63	Exploitation nulle	
35	70	32,5	1,66	Exploitation moyenne, mauvais état en 1958	
36	60	46,2	1,69	Exploitation nulle	
37	70	32,7	1,71	Exploitation nulle	
38	60	—	1,75	Exploitation nulle	
39	50	44,1	1,86	Exploitation nulle	
40	70	24,6	1,95	Exploitation nulle	

— l'autre classe extrême (1,62 < log 10 S < 1,95) présente un log 10 S moyen de 1,73. Elle renferme des sols qui dans 87,5 p. 100 des cas ont une exploitation nulle ou faible.

— la classe intermédiaire la plus importante (1,33 < log 10 S < 1,58) avec une valeur moyenne de 1,45 groupe les sols en général bien exploités par les racines, mais où des accidents d'asphyxie se sont produits en 1958, année très humide dans 61,3 p. 100 des cas. Il y a asphyxie ou exploitation faible des horizons dans 77,8 p. 100 des cas.

On voit que l'indice log 10 S réflète non seulement l'exploitation de l'horizon par les racines, mais encore les risques d'accident par asphyxie en année exceptionnelle.

L'existence d'une liaison entre stabilité structurale et exploitation des horizons s'explique facilement dans les cas extrêmes. La bonne stabilité exprime la perma-

TABLEAU 2

Stabilité structurale et exploitation des horizons. Sols sableux. Classement par log 10 K croissant

Profils	Profondeur (cm)	Teneur éléments 0-2 μ	log 10 k	Comportement	Classe
1	30	1,0	0,68	Exploitation nulle	Exploitation faible ou nullle dans 73,8% des cas
2	20	2,3	0,83	Exploitation faible	
3	0 — 10	2,5	0,97	Exploitation faible	
4	35	—	1,04	Zone durcie, exploitation faible	
5	20	7,9	1,12	Exploitation faible	
6	25	—	1,13	Exploitation bonne, asphyxie totale en 1960	
7	30	—	1,20	Zone durcie, exploitation nulle	
8	60	—	1,23	Exploitation nulle	
9	25	4,1	1,31	Exploitation faible	
10	30	—	1,32	Exploitation faible	
11	0 — 10	6,8	1,37	Exploitation bonne	
12	0 — 10	—	1,38	Exploitation bonne	
13	30	—	1,38	Exploitation nulle	
14	0 — 10	—	1,39	Exploitation bonne	
15	50	5,4	1,41	Exploitation bonne	
16	25	—	1,45	Exploitation faible	
17	0 — 10	—	1,45	Exploitation faible	
18	50	11,8	1,46	Exploitation nulle	
19	25	4,6	1,46	Exploitation nulle	
20	0 — 10	5,9	1,47	Exploitation bonne	Exploitation bonne dans 94% des cas
21	35	11,0	1,48	Exploitation bonne	
22	20	—	1,51	Exploitation faible	
23		6.85	1,57	Exploitation bonne	
24	0 — 10	—	1,63	Exploitation bonne	
25	35	—	1,65	Exploitation bonne	
26	20	8,0	1,66	Exploitation bonne	
27	50	13,9	1,73	Exploitation bonne	
28	0 — 10	—	1,74	Exploitation bonne	
29	40	—	1,76	Exploitation bonne	
30	0 — 10	—	1,77	Exploitation bonne	
31	0 — 10	—	1,81	Exploitation bonne	
32	0 — 10	—	1,83	Exploitation bonne	
33	0 — 10	4,8	1,95	Exploitation bonne	
34	0 — 10	2,3	1,98	Exploitation bonne	
35	0 — 10	7,8	2,09	Exploitation bonne	
36	0 — 10	7,5	2,12	Exploitation bonne	

nence de l'état structural ; si ce dernier est convenable il y a exploitation de l'horizon. Lorsque la stabilité est très mauvaise il est impossible d'obtenir une bonne structure en place, car les facteurs climatiques causent immédiatement sa dégradation ; il y a création d'un milieu compact et mauvaise exploitation. Les stabilités intermédiaires permettent une certaine résistance de la structure aux actions climatiques normales.

b) *Sols légers.* — Pour ces sols contenant moins de 20 p. 100 d'argile, le classement par log 10 K croissant fait apparaître deux classes (tableau 2).

— les faibles indices ($0{,}68 < \log 10\ K < 1{,}46$) avec une valeur moyenne de 1,21 correspondent à des sols peu ou pas exploités. La plupart des sols sableux durcis se trouvent dans cette classe.

— les indices élevés ($1{,}47 < \log 10\ K < 2{,}12$) correspondent à des sols bien exploités dans 94 p. 100 des cas.

Ainsi les indices de stabilité structurale apparaissent comme des tests d'appréciation du comportement des sols beaucoup plus efficaces que la granulométrie.

C. *Interprétation des propriétés structurales*

Dans les exemples précédents, nous avons considéré séparément structure et stabilité afin de montrer les liaisons existant entre le comportement des racines et l'une ou l'autre de ces propriétés.

Le tableau théorique 3 constitue en exemple qui montre la nécessité d'interpréter à la fois structure en place observée et stabilité. Il considère seulement les cas extrêmes : structure en place bonne (+) et mauvaise (—) et stabilité bonne (+) et mauvaise (—). L'interprétation est donnée dans le cas d'un verger planté et d'un sol destiné à être planté. On constate qu'une bonne stabilité ne peut compenser

TABLEAU 3

Structure	Stabilité	Interprétation	
		verger planté	verger à planter
+	+	Le bon état structural observé voit sa permanence assurée par une bonne stabilité. Bon sol	- d° - Bon sol
—	—	Mauvais état structural, facteur limitant. Mauvais sol	Impossibilité de créer une bonne structure à cause de la mauvaise stabilité. Mauvais sol
+	—	Le bon état structural observé à un moment donné sera détruit par les actions climatiques. Mauvais sol	- d° - Mauvais sol
—	+	Bonne stabilité assurant la permanence d'un état défavorable. Mauvais sol	Si l'on parvient à créer un bon état structural la stabilité assurera sa permanence.. Bon sol

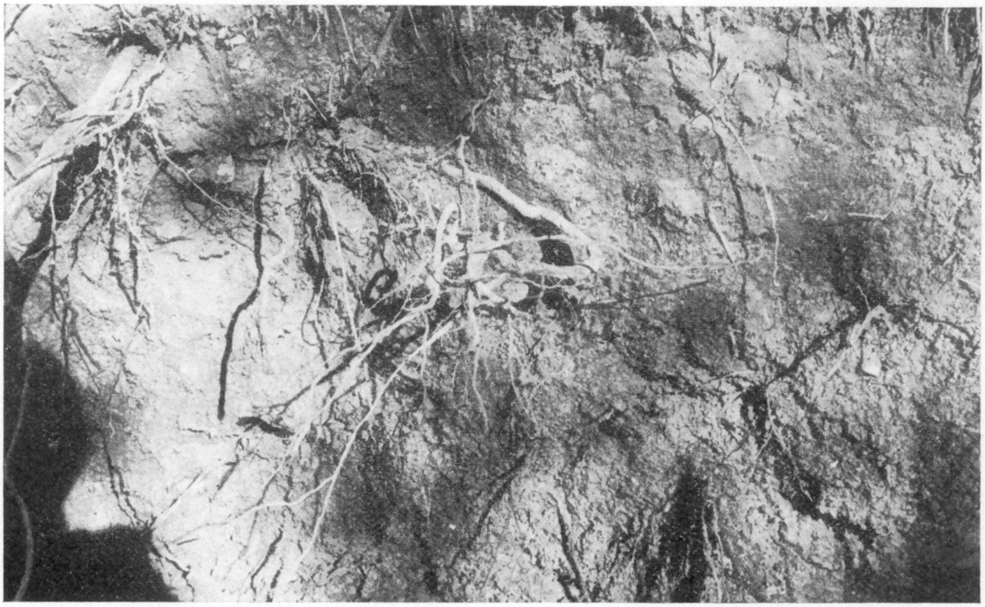
l'effet défavorable d'une mauvaise structure ; c'est le cas du profil 2 cité précédemment où un horizon à structure continue n'est pas exploité malgré une stabilité convenable.

Dans le cas de l'existence d'un bon état structural à un moment donné, mais d'une mauvaise stabilité, les racines peuvent exploiter le sol, mais à la suite d'une période humide il y a dégradation de la structure, les racines se trouvent alors dans des conditions asphyxiantes et crèvent.

Notons enfin que s'il est fréquent que structure en place et stabilité soient simultanément bonnes ou mauvaises, il est nécessaire de considérer l'ensemble des propriétés structurales pour faire l'analyse d'une situation.

VI. — LES PHÉNOMÈNES D'ENGORGEMENT PAR L'EAU

L'excès d'eau provoque un remplissage plus ou moins complet des pores du sol qui se trouve ainsi privé d'air. Cet engorgement est pour les sols de verger essentiellement temporaire et hivernal, mais il peut se prolonger plus longtemps en année humide ou durer presque toute l'année à cause de la présence d'une mouillère ou d'un plan d'eau.



Taches de gley sous un mulch dans un sol à mauvaises propriétés structurales. Les taches gris foncé sont des zones de réduction.

Lorsqu'un terrain est gorgé d'eau, en présence de matière organique, le sol prend par taches une coloration gris bleuâtre et dégage une odeur nauséabonde, c'est le *gley*, conséquence de phénomènes réducteurs et indice d'un engorgement actuel. Lorsque le sol s'aère à nouveau le fer et le manganèse individualisés lors de la phase

de mauvaise aération ont migré et se déposent en donnant des taches rouille ou brune ; il peut même y avoir création de concrétions. Ces signes permettent de voir que le sol a présenté un engorgement temporaire ou hydromorphie.

Comme ces phénomènes ont des intensités différentes suivant la texture des sols, nous examinerons séparément les différentes textures.

A. *Les sols sableux*

L'engorgement qui se manifeste en zone de bas-fond a le plus souvent une origine topographique. Cependant, nous avons observé une fois en 1958, année très humides des racines qui présentaient une écorce noirâtre, indice d'excès d'eau dans dans un sable tassé en plateau.

La même année on a constaté l'existence de racines mortes en sol sableux de bas-fond, probablement à cause de la remontée exceptionnelle du plan d'eau, qui était encore à un mètre de la surface fin Août. Le profil ne présentait pas de taches de rouille, ce qui montrait que l'engorgement était exceptionnel.

On a observé aussi que des arbres ayant souffert en 1958 de l'excès d'humidité ont vu leurs conditions de vie aggravées par le printemps humide de 1959. Ce profil présentait une très forte humidité en profondeur à partir de 20 cm et un plan d'eau à 105 cm au début d'Août 1959. Le sol autour des racines avait la couleur grise du gley.

Il existe enfin des cas où l'intensité de cette hydromorphie empêche toute croissance normale des arbres qui doivent être remplacés. Une tranchée, creusée en Août au pied d'un arbre qui avait pu survivre grâce à un rabattement des branches, a montré l'existence de nombreuses taches de rouille et de gley et la présence d'un plan d'eau à 70 cm de la surface. Toutes les racines et radicelles situées au-dessous de 30 cm de profondeur était mortes. Cette situation était aggravée par l'existence d'un sable argileux à structure continue en profondeur. Dans le cas des sables où l'excès d'eau provient d'une nappe, un drainage supprime facilement l'hydromorphie.

B. *Les sols limoneux*

La structure massive de ces sols leur confère une faible porosité, aussi sont-ils très sensibles à l'excès d'eau. Ils présentent fréquemment des horizons avec taches rouille ou brun marron, voire même avec des concrétions ferrugineuses. Il peut y avoir enfin cimentation des zones de cailloux ou des concrétions par les oxydes de fer.

Les horizons hydromorphes sont souvent exploités par les racines, car l'engorgement par l'eau n'y est que temporaire ; mais les racines installées dans ces horizons fonctionnent mal en période d'excès d'eau. Ceci se traduit par une diminution de la vigueur de l'arbre ou des accidents plus graves. Des observations analogues ont été effectuées par L. Gachon (1956) en Auvergne.

Les accidents graves sont apparus en 1958 et leur séquelle en 1959, mais ces cas graves ont été disséminés et relativement peu nombreux. Par contre, les diminutions de vigueur sont des phénomènes très fréquents. En sol limoneux on peut facilement relier la diminution de la vigueur à la présence d'hydromorphie, qui se dénote par les taches rouille ou marron ; par exemple pour des pommiers Winter Banana sur

Doucin, âgés de 9 ans, en haie fruitière la moyenne des circonférences du tronc est significativement plus faible lorsque le limon est hydromorphe : elle passe de 40,2 cm dans le sol normal à 32,5 cm en sol hydromorphe.

L'engorgement du limon par nappe d'eau libre est aussi très préjudiciable à la végétation comme c'est le cas du verger suivant situé en bordure de la Sarthe ; sur la partie hors de la zone inondable le limon est sain et la croissance d'arbres de 6 ans (Golden sur franc, conduit en plein vent) est normale ; (circonférence moyenne du tronc : 25,7 cm). Dans la zone inondable le profil présente des taches de rouille et de gley et un plan d'eau à 70 cm de la surface à la mi-juillet, quelques radicelles étaient morte et la circonférence moyenne du tronc n'était que de 18,5 cm.

Ainsi les phénomènes d'engorgement par l'eau sont fréquents en sol de limon et sont liés en partie à la faible porosité de ce matériau.

C. *Les sols argileux*

Dans ce type de sol se sont produits des accidents graves affectant de nombreux arbres conduits en plein vent ou en haie fruitière. Ces sols étaient constitués d'une couche sablo-limoneuse épaisse de 30 à 40 cm, recouvrant un horizon argileux où se trouvaient de nombreuses racines.

Les racines des arbres morts ou en mauvais état étaient mortes, présentaient une couleur brune et dégageaient une odeur d'alcool amylique indiquant une décomposition microbienne à l'abri de l'air, distincte d'une attaque de pourridié (mycelium blanchâtre et odeur de champignon). La terre au voisinage des racines avait une couleur gris bleuâtre caractéristique du gley.

Ces phénomènes sont à relier à la pluviométrie exceptionnelle de l'année 1958 : si l'on se réfère à des valeurs moyennes en considérant la période comprise entre le 1er Juillet et le 31 Juillet 1958, cette dernière date correspondant à l'époque des observations, on a les données suivantes :

Pluviométrie totale annuelle moyenne	596 mm
Pluviométrie totale de la période du 1-1-58 au 31-7-58 (1)	600 mm
Pluviométrie totale moyenne de la période du 1-1 au 31-7 pour les années de 1945 à 1957 : maximum	470 mm
moyenne	319,2 mm

Ainsi il est tombé en 7 mois 130 mm de plus que la quantité maxima enregistrée pendant les 13 dernières années.

Les phénomènes d'asphyxie ont atteint des arbres âgés de 13 à 25 ans qui présentaient une croissance moyenne (les circonférences de tronc étaient peu différentes des valeurs moyennes). Il est donc vraisemblable de penser qu'ils ont poussé normalement jusqu'en 1958.

La structure en place de ces sols est polyédrique avec des éléments de dimension moyenne ; elle est convenable à la croissance des racines qui s'y sont développées normalement. Par contre, les stabilités structurales (log 10 S) des sols ayant présenté ces accidents étaient entre les bonnes et les mauvaises stabilités dans une classe intermédiaire. (cf. tableau 1). On peut alors avancer l'explication suivante : en année normale les racines ont exploité l'horizon argileux bien structuré, la stabilité étant suffisante pour maintenir la permanence de l'état structural dans des conditions d'humidité

(1) Chiffres communiqués par M. TAILLENS. Ingénieur des Travaux météorologiques au Mans-Arnage.

normale. Mais en 1958 du fait de l'abondance des précipitations et de leur répartition jusqu'au milieu de l'été, l'intensité des actions destructrices de la structure était telle que la stabilité a été insuffisante pour assurer la permanence des édifices structuraux. Il y a eu diminution de la porosité et l'excès d'eau aidant les racines ont été maintenues en état d'aération faible ou nulle et sont mortes. Indiquons que la présence de montmorillonite, argile à fort gonflement a eu un effet sur la diminution de la porosité. En d'autres termes, ces sols présentaient une stabilité suffisante en année normale, mais insuffisante en année très humide. Ceci semble confirmé par le comportement des arbres plantés sur sols argileux analogues mais à meilleure stabilité, qui n'ont pas eu d'accidents en 1958 : c'est le cas de tous les sols lourds à log 10 S inférieurs à 1,33 qui se sont bien comportés et en particulier d'un sol avec log 10 S de 1,15 malgré un mulch de paille de 30 t/ha et une gleyification importante en surface. A la même époque les arbres sur sols à log 10 S de 1,58 avaient subi des accidents irrémédiables.

Ainsi l'indice log 10 S permet de déterminer la susceptibilité des sols lourds aux accidents dûs à des périodes humides exceptionnelles, la probabilité de ces accidents dépendant évidemment aussi de la fréquence de ces années exceptionnelles.

VII. — ACTION DU CALCAIRE

L'excès de calcaire dans un sol se manifeste le plus communément par l'apparition des chloroses qui sont des décolorations foliaires, Elles proviennent d'un déséquilibre dans la nutrition de la plante. La cause de celui-ci est très discutée (P. GOUNY et R. MAZOYER, 1953), cela peut être une insolubilisation du fer dans le sol ou une diminution de la mobilité du fer dans la plante. Il peut s'agir aussi de phénomènes

TABLEAU 4

N° du profil	Conduite	Age	Porte-greffe	Aspect du feuillage	Calcaire %	
					Total	Actif
1) 0-10	Plein vent		Franc	Pas de chlorose	2,7	2,7
55					42,3	13,1
2) 0-10	Haie fruitière		Doucin	Pas de chlorose	1,1	1,1
35			affranchi		2,05	2,05
55					18,0	13,9
3) 0-10	Haie fruitière	13	Doucin	Pas de chlorose	13,1	4,0
100					62,0	14,5
4) 0-10	Plein vent	13	Franc	Légère chlorose	19,7	8,5
50					44,3	15,1
5) 0-10	Haie fruitière	4	Doucin	Légère chlorose	19,0	6,9
40					28,8	12,7
70					58,8	15,1
6) 0-10	Plein vent	80	Franc	Chlorose	0,0	0,0
35					27,1	16,1
7) 0-10	Haie fruitière	13	Doucin	Chlorose	28,2	10,5
15					77,6	33,0
30					71,4	19,8

analogues jouant sur d'autres éléments. Nous donnons dans le tableau 4 quelques comportements de pommiers sur des sols calcaires.

L'interprétation de ces résultats est délicate à cause de la complexité des problèmes physiologiques et de l'existence de profils complexes. En effet, la plupart des sols comportent des horizons peu ou pas calcaires reposant sur des couches calcaires ; on conçoit ainsi que l'importance relative des horizons peu calcaires par rapport à la profondeur exploitée soit un facteur important pour l'établissement de la chlorose.

L'examen des chiffres du tableau précédent montre un certain parallélisme entre l'apparition de la chlorose et la teneur en calcaire actif. Il semble que la chlorose n'apparaisse pas au-dessous de 15 p. 100 de calcaire actif ; mais il ne faut pas se dissimuler que ce seuil n'a pas une signification absolue car il est fonction dans une situation donnée de la valeur des autres paramètres. Signalons, enfin, que l'établissement d'un mulch de paille a amené la disparition d'une légère chlorose ; il peut s'agir d'une répartition plus superficielle des racines absorbantes ou d'une amélioration de l'équilibre nutritif par l'humus.

Mais l'influence du calcaire peut se manifester nettement par une réduction de la vigueur de l'arbre ; c'est ce que nous avons pu constater lors des observations suivantes.

Une série d'observations particulièrement caractéristiques ont été effectuées dans un verger dont le sol était constitué d'une couche argileuse non calcaire reposant sur une couche calcaire de profondeur variable. Ce calcaire était constitué par un matériau pulvérulent contenant des cailloux de calcaire dur. Les pommiers, des Reinettes du Mans greffés sur Franc âgés de 80 ans et conduits en haute tige présentaient des vigueurs très différentes. L'examen de l'enracinement a montré l'existence d'une couche calcaire peu profonde pour les arbres peu vigoureux. La mesure de la profondeur du calcaire sous une série d'arbres a permis de calculer une corrélation de + 0,796, significativement différente de 0 au seuil 0,05 entre la profondeur du calcaire et la longueur de la circonférence du tronc des arbres. Cette liaison explique 63 p. 100 de la variabilité de la circonférence du tronc. L'examen du comportement des racines au niveau du calcaire a montré que les radicelles pénétraient ce dernier sur 5 cm d'épaisseur seulement. A ce niveau on trouvait de nombreuses impressions des racines mortes, ce qui indique que ce calcaire est un milieu défavorable pour la croissance des racines. Notons enfin que la chlorose n'apparaissait que pour un arbre sur les 8 examinés, celui pour lequel le niveau du calcaire était le plus proche de la surface.

D'autres observations ont été effectuées dans un cas plus complexe : sol lui-même calcaire reposant sur une couche très calcaire. Voici les teneurs extrêmes en calcaire des divers horizons :

	Calcaire total %	Calcaire actif %
Sol	13 à 28	4 à 10,5
Sous-sol	62 à 77,6	14,5 à 33

Le verger comportait des arbres conduits en forme libre et en haie fruitière tous âgés de 13 ans. Les coefficients de corrélation existant entre la longueur de la circonférence du tronc et la profondeur du sous-sol calcaire étaient les suivants :

— arbres en forme libre Reinettes du Mans sur franc : $r = +0,781$, significativement différent de 0 au seuil 0,10.

— arbres en haie fruitière Canada blanc sur Doucin : $r = +0,372$, significativement différent de 0 au seuil 0,10.

La chlorose n'apparaissait nettement que pour 3 arbres sur les 25 considérés et les arbres chlorosés n'étaient pas toujours ceux pour lesquels la vigueur était la moindre.

Ces observations montrent qu'un horizon calcaire peu profond déprime la vigueur de la végétation sans que les phénomènes chlorotiques apparaissent. Le calcaire étant parfois exploité par les racines, l'explication de cette action dépressive est malaisée. Elle peut se comparer à l'influence sur la croissance de propriétés physiques défavorables. Il semblerait que cette action dépressive soit surtout importante pour les calcaires fins et ne se manifeste pas sensiblement pour des calcaires durs mélangés à des éléments meubles non calcaires.

VIII. — ROLE DU SOL AU POINT DE VUE HYDRIQUE

Le sol joue un rôle primordial dans l'alimentation en eau du végétal. En effet, schématiquement, l'unité de surface plantée perd par transpiration végétale et évaporation du sol une certaine quantité d'eau ; c'est l'évapo-transpiration E exprimée en mm d'eau. Pendant la période hivernale la quantité d'eau apportée par la pluie P est supérieure à celle perdue par l'évapo-transpiration et elle suffit à l'alimentation du végétal. A mesure que l'on s'éloigne de l'hiver l'évapo-transpiration devient supérieure à la pluviométrie et c'est le sol qui doit fournir toute ou une partie de la différence E — P. On voit ainsi apparaître l'importance du sol au point de vue de l'alimentation en eau du végétal.

Après avoir examiné brièvement les caractéristiques hydriques du sol et les conditions climatiques de la Sarthe, nous montrerons l'incidence des réserves en eau sur le développement du pommier.

A. *Caractéristiques hydriques du sol*

Le sol retient par unité de poids une certaine quantité d'eau appelée capacité de rétention. La plante utilise cette eau et abaisse l'humidité du sol jusqu'à une certaine valeur qui ne peut être dépassée, le point de flétrissement. En définitive, la plante ne peut théoriquement utiliser que l'eau correspondant à l'intervalle d'humidité compris entre la capacité de rétention et le point de flétrissement. Si l'on considère un profil exploité par les racines jusqu'à la profondeur h (dm) et si d est la densité apparente du sol la quantité d'eau utile en mm est donnée par

$$R = d.h\ (CR - PF)$$

CR et PF étant respectivement la capacité de rétention et le point de flétrissement en p. 100 du poids. La quantité d'eau utile est très variable selon les types de sol ; pour une profondeur exploitée de 1 m elle passe de 75 mm pour les sables à 240 mm pour les argiles, avec une valeur intermédiaire de 150 mm pour les limons. La profondeur de l'enracinement joue un rôle important dans l'évaluation de ces réserves puisqu'elles lui sont proportionnelles de façon directe.

Enfin, ajoutons que par suite de la diffusion de l'eau une certaine quantité d'eau de l'ordre de 30 à 40 mm peut être fournie par la zone non exploitée par les racines (HALLAIRE M. 1957).

En fait, le phénomène est beaucoup plus complexe et se présente également sous un aspect dynamique : la quantité d'eau réellement utilisée par la plante dans l'intervalle capacité de rétention — point de flétrissement dépend du ryhtme de dessèchement du sol (HALLAIRE M. 1960). L'eau utilisée est d'autant plus importante que ce rythme est plus lent. Ainsi l'intervalle d'humidité capacité de rétention — point de flétrissement ne représente qu'une valeur plafond de l'eau utilisable.

Si l'on examine maintenant le comportement de divers sols secs en présence des précipitations (cas de l'été) une pluie de 100 mm humecte environ 1 000 mm de sable, 450 mm de limon et seulement 300 mm d'argile. On voit donc que dans ce dernier cas toute l'eau tombée se trouve dans les 30 premiers cm du sol et qu'une partie importante sera reprise par l'évaporation directe sans grand profit pour la plante. Par contre, dans le cas du sable la dessiccation par évaporation sera toujours limitée aux 20 premiers cm du sol par exemple, mais l'eau emmagasinée au-dessous de cette zone jusqu'à 1 m reste à la disposition du végétal. Si l'on ajoute à cela que l'évaporation est moins intense dans un sable que dans une argile, on voit que les sols légers constituent des systèmes beaucoup plus capteurs d'eau que les sols lourds.

Ainsi les sols sableux et argileux ont des propriétés tout à fait différentes. Les sols argileux présentent des réserves en eau plus importantes que les sols sableux, tandis que ces derniers sont plus aptes à utiliser les faibles précipitations estivales. Ces différences de propriétés permettent d'interpréter certaines observations effectuées dans la Sarthe :

— en année moyenne les précipitations étant bien réparties, les sols sableux qui utilisent bien les faibles chutes de pluie portent des arbres en végétation normale, par contre ces sols n'ont pas de réserves suffisantes pour assurer une alimentation en eau correcte pendant les périodes sèches un peu longues, ce qui explique leur mauvais comportement en 1959.

— les sols argileux à cause de leur capacité de réserve importante ont vu les arbres bien se comporter pendant la période sèche de 1959. Il faut cependant faire exception pour les arbres sur argile mal structurée et ceux ayant souffert d'asphyxie des racines en 1958. En effet le système radiculaire est superficiel dans le premier cas et en partie détruit dans le second. Ajoutons que l'action favorable des capacités de réserve en eau élevées ne s'exerce que lorsque les précipitations hivernales sont suffisantes pour amener le sol à la capacité de rétention, ce qui est le cas général. On voit ainsi apparaître la nécessité d'interpréter les données relatives au sol dans un contexte climatique donné.

— les profils constitués par un horizon sableux recouvrant un horizon argileux participent des avantages des deux types de texture. L'argile permet d'avoir des réserves importantes tandis que le sable de surface aboutit à la mise à l'abri de l'évaporation directe de la plus grande partie des précipitations. Aussi, n'est-il pas étonnant que ces types de sol, lorsque les propriétés physiques sont bonnes, soient parmi les meilleurs de ceux rencontrés dans la Sarthe.

B. *Caractéristiques climatiques*

Les valeurs nécessaires au calcul du bilan de l'eau sont l'évapotranspiration et la pluviométrie. La valeur la plus intéressante de l'évapotranspiration correspond au fonctionnement optimum du végétal, c'est l'évapotranspiration potentielle E_p,

valeur de l'évapotranspiration de l'unité de surface bien couverte par la végétation, dans le cas où l'alimentation en eau est abondante. C'est en quelque sorte l'évapotranspiration optimum d'une culture toujours bien alimentée en eau. L'évapotranspiration potentielle est essentiellement fonction des facteurs climatiques, aussi peut-on la calculer. Nous utiliserons ici la formule de L. TURC (1961).

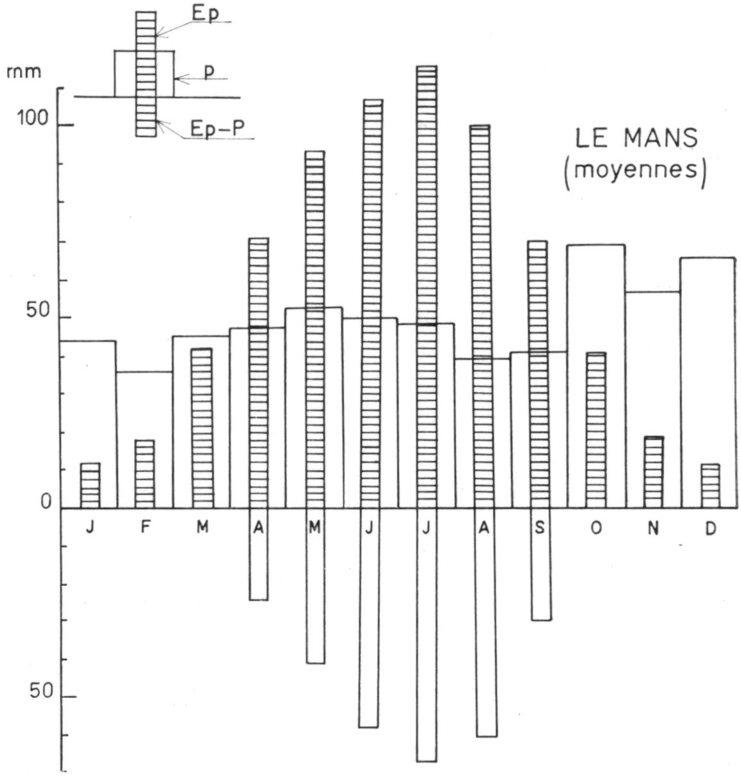


FIG. 5. — *Valeurs moyennes mensuelles de la pluviométrie P de l'évapotranspiration potentielle Ep et du déficit Ep — P de la pluviométrie sur l'évaporationtranspiration au Mans.*

Les valeurs moyennes mensuelles de l'évapotranspiration potentielle et de la pluviométrie sont portées sur le graphique n° 5. On voit sur ce graphique que la pluviométrie moyenne est assez bien répartie au cours de l'année et que d'Avril à Octobre l'évapotranspiration est supérieure à la pluviométrie. Il y a donc déficit E_p — P de la pluviométrie par rapport à l'évapotranspiration potentielle. Pour l'ensemble d'une année normale ce déficit atteint 280 mm (L. TURC et Th. GOBILLOT, 1960). Ceci est évidemment une valeur moyenne qui peut être inférieure ou supérieure aux valeurs des années particulières. Ainsi en 1959, année sèche le déficit était de l'ordre de 376 mm.

C. *Influence des capacités de réserves en eau sur la croissance des arbres*

Pour montrer l'influence des capacités de réserve en eau sur la croissance de l'arbre, nous avons établi qu'il existe une régression significative entre la vigueur de l'arbre mesurée par la circonférence du tronc et la capacité de réserve en eau (J. ARNOUX et R. GRAS, 1961). La réserve en eau a été évaluée à partir de l'humidité équi-

valente mesurée par la méthode Bouyoucos, de la profondeur d'enracinement et de la densité du sol. La profondeur d'enracinement considérée est celle mesurée sur une tranchée au voisinage du tronc, en considérant l'épaisseur de sol comprise entre la surface et la racine la plus profonde de diamètre au moins égal au mm. Elle ne représente qu'une approximation de la valeur réelle, qui peut d'ailleurs varier d'un point à un autre pour un même sujet selon la forme et l'asymétrie de l'enracinement ; aussi la profondeur utilisée n'a-t-elle de sens que si l'on considère une population de mesures ce qui est le cas ici. On a pris pour eau utile la moitié de l'humidité équivalente.

Comme on est obligé de considérer des arbres d'âges différents il est nécessaire d'introduire l'âge dans l'équation. Finalement il s'agit d'établir une équation de régression entre la circonférence du tronc y (en cm), l'âge de l'arbre t (an) et la réserve en eau du sol x(mm) ou des fonctions de ces variables.

Pour les arbres conduits en forme palissée, greffés sur doucin avec des valeurs des variables comprises dans les intervalles suivants :

$$12 \text{ cm} < y < 40 \text{ cm}$$
$$4 \text{ ans} < t < 13 \text{ ans}$$
$$65{,}7 \text{ mm} < x < 295 \text{ mm}$$

on obtient l'équation suivante :

$$y = 20{,}10 + 27{,}20 \log t - 1\,371 \cdot \frac{1}{x}\cdot$$

Pour les arbres en forme libre, greffés sur franc, des nécessités d'échantillonnage (cf. annexe 4) ont obligé à ne considérer que les arbres poussant sur sol lourd. Les variables étant comprises dans les limites suivantes :

$$17{,}5 \text{ cm} < y < 97{,}5 \text{ cm}$$
$$7 \text{ ans} < t < 25 \text{ ans}$$
$$44{,}4 \text{ mm} < x < 243{,}2 \text{ mm}$$

l'équation de régression s'écrit :

$$y = -\,58{,}38 + 112{,}18 \log t - 1\,890 \cdot \frac{1}{x}\cdot$$

L'étude de la signification de ces équations par l'analyse de la variance est contenue dans le tableau suivant :

	Forme palissée				Forme libre			
	Degrés de liberté		Variance	F	Degrés de liberté		Variance	F
Regression double en logt et $^1/_x$	2		413,47	26,66	2		3086,84	31,12
Regression de logt		1	453,79	29,26		1	4823,06	38,63
Regression de $^1/_x$ après ajustement pour logt		1	373,15	24,06		1	1350,62	13,62
Regression de $^1/_x$		1	435,71	28,09		1	3656,11	36,86
Regression de logt après ajustement pour $^1/_x$		1	391,23	25,22		1	2517,57	25,38
Variation résiduelle	11		15,91		14		99,17	

Les régressions sont significatives au point 1 p. 100. La présence dans les équations de régression du terme réserve en eau (x) qui explique de façon significative après ajustement de la variable t une partie de la variation de y confirme l'action des capacités de réserve en eau sur la croissance du végétal.

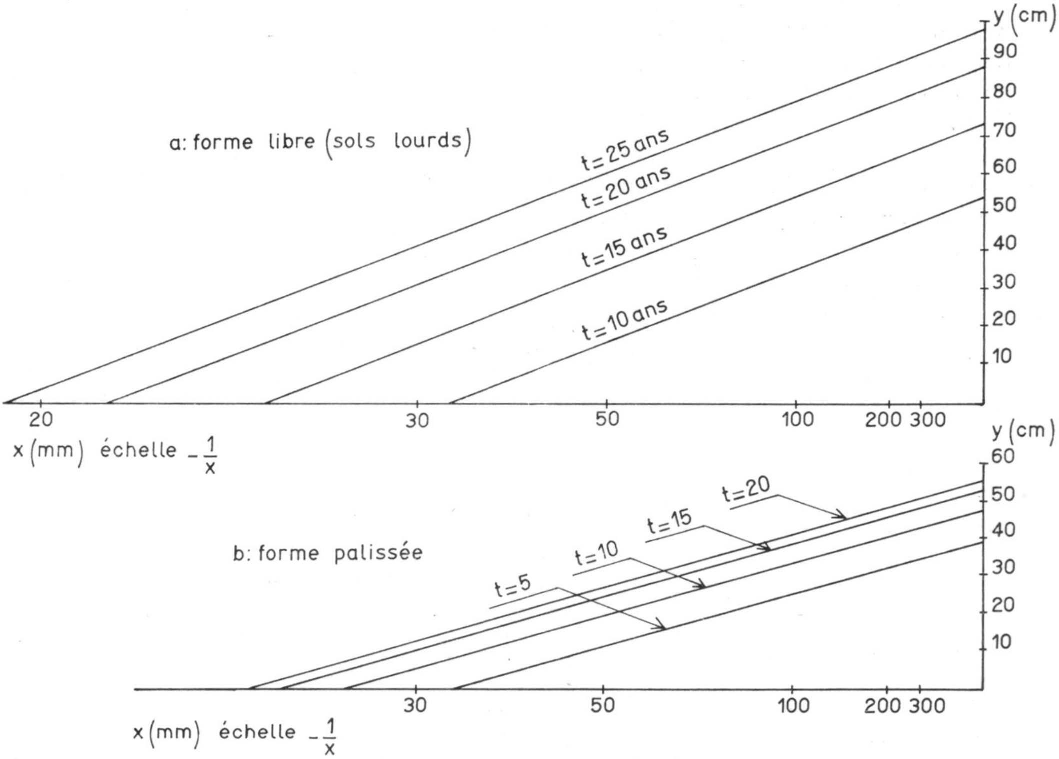


FIG. 6. — *Relation entre la longueur de la circonférence du tronc y et la capacité de réserve en eau du sol x, pour des âges t différents.*

On peut traduire sur un graphique les variations de y en fonction de l'une des variables t ou x, en laissant l'autre variable constante. Pour montrer les relations de y en fonction de x on donne des valeurs discontinues à t. Cela revient à tracer les hyperboles représentatives des fonctions $y = a\ (t) - b \cdot \frac{1}{x}$. Pour simplifier la construction de cette abaque nous porterons en abscisse x sur une échelle transformée $-\frac{1}{x}$ (fig. 6). La circonférence du tronc croit moins que proportionnellement avec la réserve en eau du fait de la relation hyperbolique existant entre y et x. Il est intéressant de voir au-delà de quelle valeur des réserves en eau ces accroissements sont négligeables. Pour cela on considère les accroissements successifs $\Delta\ x$ de 100 mm et on calcule les accroissements correspondants $\Delta\ y$ ainsi que les accroissements relatifs $100\ \Delta\ y/y$, y étant la valeur initiale (par exemple pour x passant de 100 à 200 mm on prendra pour y la valeur correspondant à 100 mm). On obtient les chiffres suivants pour des âges voisins de ceux d'entrée en production : 5 ans pour les formes palissées, 10 ans pour les formes libres.

Forme palissée (5 ans)

pour x (mm) passant de	$\Delta\ y$	$100\ \Delta\ y/y$
100 à 200	6,8	27
200 à 300	2,3	7
300 à 400	1,1	3,3

Forme libre (10 ans)

pour x (mm) passant de	$\Delta\ y$	$100\ \Delta\ y/y$
100 à 200	9,5	27
200 à 300	3,1	6,9
300 à 400	1,6	3,3

On constate alors que les accroissements relatifs de la circonférence du tronc deviennent inférieurs à 5 p. 100 lorsqu'on dépasse la valeur de 300 mm avec des accroissements successifs de 100 mm. Ceci indique que l'on se trouve à une valeur de x voisine de l'optimum. Cette valeur de 300 mm est de l'ordre de grandeur du déficit théorique : 280 mm de la pluviométrie sur l'évapotranspiration potentielle calculée à l'aide de données climatiques. Ainsi sous le climat de la Sarthe la croissance optimum en conditions naturelles (absence d'irrigation) semble obtenue pour une capacité de réserve du sol de l'ordre de grandeur du déficit normal de la pluviométrie sur l'évapotranspiration. Cette convergence a un sens essentiellement écologique et n'implique nullement que l'optimum de croissance ne puisse être relevé par des apports complémentaires d'eau les années où le déficit dépasse la valeur moyenne de 280 mm, ou par une amélioration des techniques de culture.

IX. — RICHESSE EN ÉLÉMENTS FERTILISANTS

Les tests Barbier-Morgan effectués sur quelques échantillons permettent d'avoir une idée de la richesse en potasse et en acide phosphorique.

Les sols sableux sont généralement très pauvres en ces deux éléments. Leur teneur décroît rapidement avec la profondeur, les 30 premiers cm étant les mieux pourvus. Il existe une légère différence dans la distribution verticale de la potasse et de l'acide phosphorique. Pour l'acide phosphorique les indices sont inférieurs à 5 (besoin immédiat) à partir de 40 cm et les quantités de P_2O_5 sont nulles au-dessous de 50 cm. Dans le cas de la potasse la décroissance est moins rapide en fonction de la profondeur. On retrouve ainsi les résultats signalés par d'autres auteurs (Liwerant 1957) sur l'immobilité des éléments fertilisants à l'intérieur du sol.

Notons que si dans certains terrains la teneur en potasse augmente en profondeur, cela peut être dû à la présence de glauconie, silicate potassique assez facilement décomposable qui a été décelée lors de l'analyse granulométrique. Ainsi la majorité des éléments fertilisants se trouve dans les 30 premiers cm du sol et il est vraisemblable que la totalité de la nutrition minérale en potasse et phosphore se fait à partir de l'horizon supérieur, d'où la nécessité d'une nappe de racines superficielles. Ces résultats montrent l'intérêt d'une fumure de fond phospho-potassique avant plantation ou d'un enfouissement d'engrais à la sous-soleuse.

Si du fait de la faible migration des éléments comme la potasse et l'acide phosphorique des racines peu profondes sont nécessaires, la répartition de l'enracinement sur la plus grande profondeur possible améliore nettement l'utilisation de l'azote entraînée en profondeur sous forme nitrique par lessivage.

X. — INFLUENCE DU SOL SUR LA VIGUEUR DE L'ARBRE ET LE RENDEMENT

Il serait essentiel de connaître les conséquences de l'action du sol sur les rendements qualitatifs et quantitatifs. Malheureusement, si l'on peut avoir une idée de l'action du sol sur les caractéristiques de vigueur il est beaucoup plus difficile de mesurer ou d'évaluer les variations de rendement ainsi introduites. Nous avons rassemblé ici quelques valeurs numériques relatives à la circonférence du tronc et quelquefois au rendement.

Comparaison entre sol sableux et argileux : pour des arbres de 10 ans greffés sur franc et conduits en plein vent la longueur moyenne de circonférence passe de 43,5 cm sur sol argileux à 37,5 cm sur sol sableux. A 13 ans ces valeurs sont respectivement 62,2 et 51,2 et les rendements par arbre passent de 105 à 75 kg (évaluation par une formule de régression).

Influence de l'hydromorphie : sur des haies fruitières de 9 ans, Winter banana sur doucin, la longueur moyenne de la circonférence passe de 40,2 cm à 32,5 cm lorsque l'hydromorphie apparaît à 50 cm de profondeur en sol limoneux. Dans le même type de sol les inondations périodiques diminuent la circonférence de 25,7 à 18,5 cm pour des pommiers Golden sur franc âgés de 6 ans. Sur sable, un plan d'eau fluctuant abaisse la circonférence moyenne du tronc de 37,6 à 26,6 cm pour des arbres sur franc âgés de 10 ans.

Influence d'un horizon à structure continue : l'apparition d'un horizon continu hydromorphe en sol argileux se traduit sur des pommiers Richared sur franc âgés de 10 ans, en buisson américain, par une diminution de la circonférence moyenne du tronc de 52 à 29 cm, les rendements par arbre passant de 180 à 60 kg environ.

Un horizon calcaire peu profond diminue la circonférence de pommiers sur franc âgés de 80 ans conduits de plein vent de 120 à 66 cm.

Signalons enfin quelques indications étrangères. Von NEUMANN D. (1958) signale des diminutions de rendement de 1,5 à 45,8 p. 100 du témoin considéré comme sol moyen, lorsqu'on utilise un sol médiocre, pour des pommiers âgés de 14 ans conduits en plein vent.

ROGERS W. S. et VYVYAN M. C. (1934) indiquent pour des pommiers sur doucin âgés de 10 ans des rendements de 93,25 kg et 52,80 kg selon le type de sol.

Lors d'essais de porte greffes clonaux PRESTON A. P. (1955) signale des rendements cumulés de 5 ans sur sols sableux qui sont 43,9 à 42, 8 p. 100 de ceux sur sols limoneux.

Ces quelques exemples montrent que par les variations de rendement introduites le sol peut conduire à des différences notables du prix de revient des fruits.

XI. — CONCLUSIONS : SOL ET PLANTATION D'UN VERGER DE POMMIERS

La détermination des aptitudes du sol doit conduire au choix du terrain à planter et éventuellement à l'utilisation de techniques particulières de plantation et d'entretien du sol. Ceci aboutit à déterminer pour un sol donné la résultante de l'action sur le végétal des différentes propriétés du sol. Une synthèse sous forme de relation statistique unique entre ces diverses propriétés et la croissance de l'arbre serait évidemment souhaitable. Mais une telle synthèse déjà difficile à réaliser dans le domaine biologique pour des éléments quantitatifs, à cause d'interactions et d'effets cumulatifs, est actuellement impossible ici. En effet, certains facteurs et non des moindres en importance (structure en place, hydromorphie) sont qualitatifs. La seule possibilité est d'effectuer sur les sols un diagnostic synthétique. Nous allons dégager quelques principes généraux d'interprétation, indiquer la façon d'opérer sur le terrain et examiner les conséquences du diagnostic.

A. *Facteurs favorables et défavorables*

D'une façon générale, les meilleurs sols sont constitués par des argiles saines, bien structurées et à bonne stabilité structurale. Les sables même meubles provoquent souvent des enracinements superficiels et sont en général mal exploités. Les sols limoneux présentent toutes les possibilités au point de vue de la végétation des arbres, la gamme des vigueurs s'étendant des très bonnes au très mauvaises, ce qui rend difficile une prévision valable du comportement des arbres sur de tels sols.

A l'intérieur des catégories précédentes les facteurs favorables sont :

— la présence de matière organique pour améliorer les propriétés des sables et des limons.

— l'existence d'un horizon même faiblement argileux à moins de 1 m de profondeur en sol sableux, sauf si cet horizon empêche le drainage. Un horizon argileux a les mêmes effets en sol de limon.

Les éléments défavorables sont par ailleurs :

— l'hydromorphie soit permanente soit temporaire. Selon l'intensité et la durée de ce phénomène la conséquence peut aller d'un mauvais fonctionnement temporaire du système radiculaire à la mort des racines.

— les couches durcies (alios de podzols) ou les zones ferrugineuses des limons constituent des obstacles mécaniques à la pénétration des racines et peuvent créer un engorgement par l'eau.

— les horizons de calcaire fin qui sont généralement inexploités par les racines diminuent la profondeur de sol utile.

— les horizons à structure continue, qu'il s'agisse de sable, de limon ou d'argile sont mal ou pas exploités.

— une stabilité structurale médiocre peut amener des accidents d'asphyxie en sol argileux lors d'années très humides.

En définitive, la situation idéale est celle où les racines peuvent exploiter une grande épaisseur de sol à réserve en eau utile élevée et à niveau chimique satisfaisant, les racines devant pouvoir toujours fonctionner normalement.

B. *Examen du sol et diagnostic*

Les considérations précédentes constituent seulement des indications qui permettent d'interpréter les observations à faire obligatoirement sur le sol en place destiné à être planté. Ces observations s'effectuent de la façon qui a été indiquée précédemment sur des tranchées creusées en plusieurs endroits du champ. Sur les échantillons prélevés dans chaque horizon on détermine la stabilité structurale, le pH, le phosphore, la potasse et les caractéristiques hydriques.

Le technicien doit ensuite en possession de tous ces éléments donner un diagnostic synthétique qui devra tenir compte de la hiérarchie des facteurs. Par exemple, si un horizon plus lourd constitue un facteur favorable dans un sable meuble il ne doit pas modifier le jugement défavorable à porter lorsque le sable est compact, ce caractère de compacité étant un facteur limitant essentiel.

Ce diagnostic doit permettre de classer le sol dans la catégorie favorable ou défavorable. Dans ce dernier cas, il peut s'agir de propriétés physiques prohibitives impossibles ou difficiles à modifier (hydromorphie en limon, couches de calcaire fin peu profondes etc...) ou de facteurs moins favorables pouvant être améliorés. Ce dernier cas est celui d'un sol sableux meuble qui après fumure minérale et organique abondantes et éventuellement irrigation pourra être utilisé sans aléas.

C. *Incidences du sol sur la plantation du verger*

Une fois en possession du diagnostic l'arboriculteur doit prendre une décision sur la plantation du verger. Il peut s'agir de cas entièrement favorables ou franchement défavorables. Plus fréquemment il s'agit de cas intermédiaires où les aléas sont à craindre. C'est alors qu'interviennent les techniques à mettre en œuvre avant plantation et permettant de redresser certaines situations : drainage, sous-solage permettant de disloquer un alios ou une roche en voie d'altération, plantation sur buttes dans le cas de sols à mauvaise stabilité structurale, défoncement, incorporation de fumier etc...

Certaines modalités d'entretien du sol peuvent pallier en partie certains inconvénients : mulch de paille permettant une économie d'eau en sol sableux, enherbement permanent aboutissant à un certain assèchement d'un sol humide, engazonnement permanent et engrais vert d'hiver améliorant la structure...

En ce qui concerne l'espèce à planter, on dispose de peu de renseignements pour les fruits à pépins, si ce n'est que le poirier paraît plus résistant à l'excès d'eau que le pommier. Il conviendra donc d'installer les poiriers dans les situations légèrement hydromorphes à la place du pommier, en notant toutefois qu'on diminue ainsi les probabilités de risque sans les supprimer totalement.

Le choix du porte-greffe ne doit pas se faire en fonction de la profondeur de sol utilisable. En effet si l'on peut noter une légère tendance à l'enracinement superficiel de certains porte-greffe pour des profondeurs supérieures au mètre (cf annexe 3), il n'existe pas à proprement parler de porte-greffe « traçant » et « pivotant ». Par contre certains caractères, d'ailleurs mal connus, de non-adaptation au sol (sensibilité d'EM IX aux textures légères et à l'excès d'eau par exemple) sont à prendre en considération. Sous réserve que ces exigences soient satisfaites, ce sont des questions de forme, de vigueur et de précocité de mise à fruits qui doivent intervenir dans le choix du porte-greffe.

Il n'y a pas, en ce qui concerne les formes, de choix à faire en tenant compte du sol, si ce n'est dans le cas particulier suivant : en présence de facteurs défavorables assez profonds (horizon hydromorphe à 1 m de la surface par exemple), il y a intérêt à choisir une forme palissée ou semi libre de longévité plus réduite. En effet, le végétal verra son rythme de croissance diminuer lorsque les racines atteindront la zone défavorable et il y a intérêt à utiliser au maximum l'arbre au début de son développement. La taille des arbres doit être prévue en fonction du mode d'entretien du sol adopté. Les formes basses sont à proscrire en sol argileux peu stable où le mulch ne doit pas être utilisé et où il sera nécessaire de passer des instruments aratoires.



Plantation sur butte. Cette technique permet de limiter les excès d'eau en zone de bas fond.

Dans le cas d'arbres plantés sur sols légers, notamment pour les formes palissées il faudra adopter une distance de plantation plus grande qu'en sols lourds pour limiter la concurrence en eau.

La connaissance du sol sera également nécessaire une fois le verger planté pour éviter certaines erreurs. C'est le cas par exemple d'un verger avec horizon imperméable à faible profondeur où des apports d'eau trop importants lors d'irrigation ou de lutte contre le gel peuvent créer artificiellement un excès d'eau préjudiciable aux racines.

Nous avons montré sur ces quelques exemples l'incidence des propriétés du sol sur la plantation d'un verger et la conduite de celui-ci une fois planté. La décision à prendre pour le choix des porte-greffes et des formes doit tenir compte, outre les considérations économiques et financières, des caractéristiques propres du milieu. Il est nécessaire que l'arboriculteur sache que dans certains cas il doit s'attendre à des aléas et adopter en conséquence tel mode d'entretien du sol, car cela intervient sur la

rentabilité de l'entreprise. La connaissance du sol, du fait de la complexité des facteurs mis en jeu, se présente sous forme de probabilité. C'est finalement l'interprétation raisonnée de l'examen du profil cultural, qui à l'heure actuelle fournit le plus d'informations sur le comportement du futur verger et sur les options à prendre lors de la plantation.

ANNEXE

1° Les différents types de sols

Nous indiquons d'abord brièvement les formations géologiques présentes dans les zones étudiées. Les roches citées ne constituent pas toujours la roche-mère à partir de laquelle le sol s'est formé, car des dépôts superficiels peuvent surmonter cette dernière.

Secondaire :

c^7 séonien décalcifié (argile à silex)
c^6 turonien décalcifié se présentant sous forme d'argile à silex
c^{5a} cénomanien calcaire
c^5 sable du Perche
c^{4s} sable et grès du Mans : sable grossier plus ou moins argileux
c^3 argile verte riche en glauconie
c^{6b} turonien supérieur (craie tendre)

Tertiaire :

e^v argile à silex non remaniée

Quaternaire :

p limon des plateaux
a^2 alluvion moderne sableuse

La carte géologique ne donne qu'une idée très imparfaite de la constitution des sols car les dépôts superficiels peu épais n'y sont pas représentés, c'est le cas notamment des sables et limons recouvrant l'argile à silex. D'autre part, les limites de formations géologiques sont fort approximatives. Ces considérations montrent qu'un tel document est nettement insuffisant pour la connaissance des sols.

Après avoir rappelé les différentes granulométries ou textures, nous donnerons une classification des sols utilisant ce critère. Nous examinerons séparement le cas des sols calcaires.

A. — *Sols non calcaires*

Les textures suivantes ont été définies :

— texture argileuse comportant au moins 25 p. 100 d'éléments compris entre 0 et 2 μ [1]. La teneur en ces éléments peut atteindre 60 p. 100. Un exemple est donné par la figure 7 a.

— texture limoneuse comportant 30 p. 100 au moins d'éléments de diamètre 2-50 μ. La teneur en argile va de 24 à 7 p. 100. Ce type granulométrique est donné par le sol de la figure 7 b. Il existe des termes de transition avec les sables, comme par exemple 7 c.

[1] Analyses effectuées sans destruction de calcaire.

— texture sableuse, elle possède au moins 75 p. 100 d'éléments de diamètre 50 à 2000 μ, en général de 60 à 80 p. 100. La teneur moyenne en argile est de 3 p. 100 environ. Un exemple est donné par la figure 7 d. Il existe des types plus argileux comportant jusqu'à 24 p. 100 d'argile : 7 e.

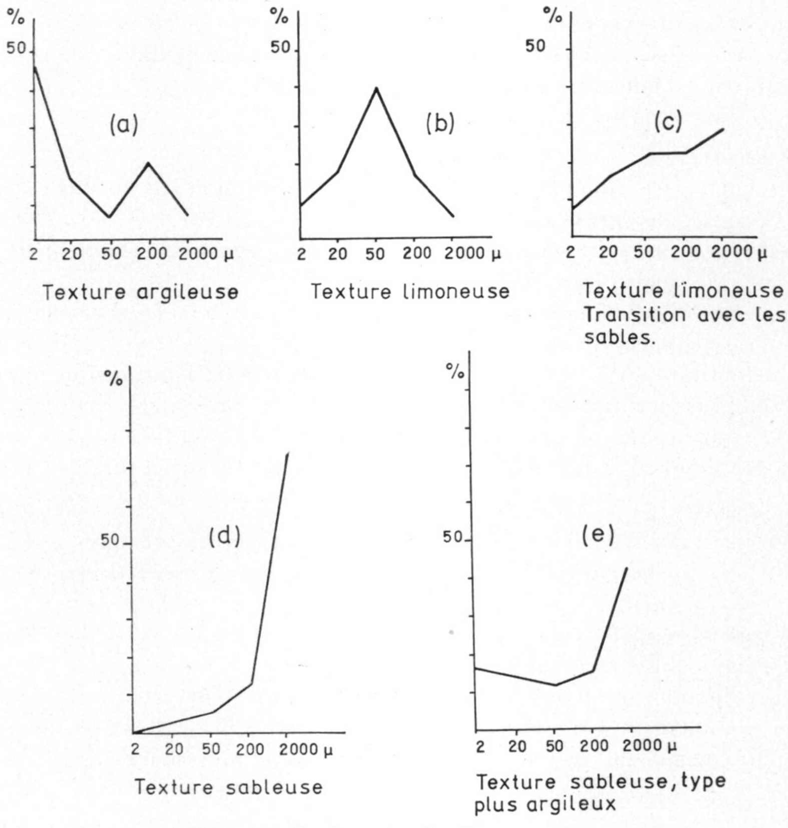


FIG. 7. — *Représentation des diverses textures.*

Classification et types de sols.

La texture peut être uniforme à l'intérieur d'un même profil que l'on qualifiera d'homogène, ou bien présenter des variations. On a alors un profil complexe.

a) *Profils homogènes.*

Présentant la même texture dans tout le profil.

Sols sableux. — Il faut distinguer les sols sableux à horizon non ou peu différencié (sols non évolués) des sols à horizon différencié (sols évolués).

Sols peu évolués. — Le profil suivant peut être considéré comme le type de ces sols.

0-15 cm : gris très clair peu humifère sableux, structure monoparticulaire
15-105 cm : beige sableux, structure monoparticulaire
105 ... : gris mastic à taches rouges, sablo-argileux.

Ces sols peuvent présenter en profondeur un horizon plus argileux. Ils ont en général une structure monoparticulaire bonne, cependant certains présentent un horizon durci. La capacité de rétention en eau est faible mais varie avec la finesse de la granulométrie.

Sols sableux évolués. — Ce sont les podzols dans lesquels les horizons se différencient par les teneurs en matière organique. C'est le cas de ce profil.

0-20 cm : gris noir très humifère, sableux, monoparticulaire
20-30 cm : blanchâtre sableux monoparticulaire
30-40 cm : gris noir humifère.

Sols limoneux :

0-15 cm : gris limoneux, structure grumeleuse faible en surface. Taches de gley grises au milieu de la raie
15-45 cm : beige limoneux, structure monoparticulaire à faiblement grumeleuse. Rares taches de rouille
45-60 cm : beige limoneux, monoparticulaire à faiblement grumeleux. Taches marron rouille à gris mastic.

La structure de ces sols est grumeleuse en surface et continue en profondeur. Leur stabilité structurale est en général médiocre. Ils présentent fréquemment des taches de rouille ce qui dénote une mauvaise aération pendant les périodes humides. Certains de ces sols sont faiblement calcaires en surface ou sur la totalité du profil.

Sols argileux :

0-30 cm : gris légèrement humifère argileux, structure prismatique en surface
30 : beige bariolé de rouge, argileux, structure polyédrique à gros éléments.

Ces sols possèdent en général une structure prismatique ou polyédrique à gros éléments. La stabilité structurale est moyenne à bonne. On a noté pour deux profils la présence de montmorillonite qui présente un certain gonflement à l'eau mais sans diminuer notablement la perméabilité. Certains sols du reste peu nombreux présentent simultanément une structure en place et une stabilité très mauvaises.

b) *Profils complexes.*

Ils sont constitués par des horizons de texture différente, en général un horizon assez léger reposant sur un horizon argileux.

Sable sur argile :

0-10 cm : jaune grisâtre très clair sableux monoparticulaire
10-45 cm : jaune sableux, taches de rouille, monoparticulaire
45 : vert à taches gris foncé, argilo-sableux, structure prismatique à polyédrique à gros éléments.

Certains de ces sols présentent un niveau de taches de rouille immédiatement au-dessus de l'argile, ce qui montre l'existence d'un engorgement temporaire par l'eau.

Limon sur argile :

0-15 cm : gris légèrement humifère, limoneux, finement grumeleux
15-30 cm : beige limoneux, finement grumeleux
30 : gris mastic à taches rouges, argileux, structure polyédrique à continue, pseudo-gley net.

Sable limoneux sur argile :

0-20 cm : gris sablo-limoneux légèrement rouillé en surface. Structure grumeleuse à monoparticulaire

20-50 cm : beige, sablo-limoneux faiblement grumeleux

50 : gris mastic argileux. Structure polyédrique fine (2 à 3 cm). l'argile est une montmorillonite.

La stabilité structurale de l'ensemble du profil est moyenne.

B. — *Sols calcaires.*

A quelques exceptions près, la granulométrie de ces sols ne présente que peu de relations avec celle des sols précédents et les profils sont toujours complexes avec des augmentations de la teneur en calcaire en profondeur. Voici la description de deux profils :

Profil argileux.

0-25 cm : gris très clair humifère, argilo-sableux (10 p. 100 de calcaire total). Structure grumeleuse à polyédrique

25-60 cm : beige et verdâtre, argilo-sableux, structure polyédrique assez fine (28 p. 100 de calcaire total)

60 : blanchâtre, calcaire avec impression d'anciennes racines (58,8 p. 100 de calcaire total).

La stabilité structurale des deux horizons supérieurs est moyenne, tandis que celle de l'horizon profond le plus calcaire est médiocre.

Profil sableux.

0-15 cm : gris clair à jaune, sableux monoparticulaire (calcaire 2,7 p. 100)

15-40 cm : jaune sableux monoparticulaire

40 : blanchâtre sablo-limoneux (calcaire 42,3 p. 100).

C. — *Répartition des sols.*

Elle est extrêmement variable, même à l'intérieur d'un même verger. Il arrive souvent aussi que si la constitution générale du profil ne présente pas de variations importantes, des caractères secondaires comme l'hydromorphie soient inégalement répartie.

Les profils complexes, sable fin reposant sur argile par exemple, sont de beaucoup les plus nombreux ce qui complique singulièrement l'interprétation des observations.

2° Liaison vigueur de l'arbre-rendement

Le rendement considéré du point de vue qualitatif et quantitatif constitue le critère idéal de jugement de la valeur d'un arbre fruitier. En fait, le rendement qualitatif n'est pas mesurable, tandis que le rendement en quantité n'est connu qu'approximativement pour l'ensemble d'une pièce de terre, alors qu'il est nécessaire pour juger d'une situation de connaître le rendement de chaque sujet.

Il est dans ces conditions intéressant d'examiner s'il n'existe pas de liaison entre un critère plus facilement mesurable et le rendement. Le critère facilement appréciable peut-être le volume de la couronne, la section de celle-ci, la longueur de

la circonférence du tronc etc... Nous considérons la liaison rendement-circonférence du tronc, cette dernière mesure étant déjà utilisée pour la comparaison des arbres.

Un auteur allemand (NEUMANN. D., 1958), entre autres, signale l'existence d'une liaison entre le rendement et la longueur de la circonférence du tronc. Cette liaison s'exprime par le coefficient de corrélation r ou le coefficient de régression b de l'équation :

$R = bx + a$ ou R = rendement (kg/arbre) estimé
x = longueur de la circonférence du tronc (cm).

Ce coefficient de régression indique, que pour des arbres de même âge, à un supplément de la longueur de circonférence de tronc de 1 cm, correspond en moyenne à un accroissement de rendement de b kg par sujet. L'auteur déjà cité indique une série de chiffres relatifs au pommier de laquelle nous extrayons ces valeurs :

Variété	porte-greffe	Coefficient de régression (b) et de corrélation (r) entre la circonférence du tronc (cm) mesurée à 14 ans et : rendement à 14 ans		rendement à 16 ans		rendement cumulé de 14-15 et 16 ans	
		b	r	b	r	b	r
différentes	EM XI	3,3		4,2		6,0	
différentes	franc	3,0		2,3		5,4	
différentes	EM XI	1,9		2,7		4,2	
Pfannknchen ...	EM XI					5,6	0,86
Klarapfel	franc					6,0	0,64
Ontario	EM XI					2,2	0,14
Cox Orange	EM XI					4,1	0,62

Cette corrélation dépend fortement des facteurs écologiques, mais aussi de la variété et du porte-greffe. Elle est en particulier plus élevée pour les francs que pour le EM XI.

Dans la Sarthe, l'utilisation des mesures de Monsieur ANQUEZ a permis de mettre en évidence des liaisons analogues entre rendement et longueur de la circonférence du tronc :

pommiers Reinette du Mans, plantés et greffés en 1943. Conduite plein vent.

x = circonférence du tronc (cm) à 15 ans $30 < x < 73{,}5$

R_6 = rendement estimé cumulé de 6 années (kg/arbre) (âge = 9-10-11-12-13-15 ans) $102 < R_6 < 975{,}5$

$R_6 - 412 = 16{,}47\ (x - 490)$

$R_6 = 16{,}47\ x - 404{,}23$. Le coefficient de corrélation est de 0,918 ; il est significatif au point 0,01. Une augmentation de 1 cm de la longueur de la circonférence du tronc correspond à une augmentation de rendement cumulé de 6 ans de 16,47 kg, soit un supplément annuel de 2,74 kg.

— pommiers plantés en 1880 et surgreffés en 1947 (âge = 67 ans). Variété Reinette du Mans. Plein vent.

x = circonférence du tronc mesuré à 75 ans $76 < x < 135$

R_6 = rendement estimé cumulé de 6 ans (1950 à 1955) $489 < R_6 < 1628$

$R_6 - 1110 = 12{,}2\ (x - 106{,}2)$

$R_6 = 12{,}2\, x - 185{,}64$. Le coefficient de corrélation de 0,594 est significatif au point 0,05.

L'existence d'une liaison longueur de la circonférence du tronc-rendement justifie l'utilisation de la circonférence du tronc comme critère d'appréciation des arbres. Elle montre également que les caractéristiques du sol en modifiant la vigueur des arbres influent sur leur rendement.

3° Sols et enracinement des divers porte-greffes.

Dans la Sarthe la majorité des porte-greffes sont des francs pour les arbres en plein vent et des Doucins pour les haies fruitières. Il est ainsi difficile de déterminer le comportement d'un porte-greffe donné en fonction du sol. Nous allons cependant donner quelques indications provenant de travaux anglais.

Rogers et Vyvyan (1934) ont étudié les enracinements de porte-greffes EM IX, II, I et XVI, plantés dans des sols limoneux, sableux et argileux. Il s'agissait de pommiers de 10 à 11 ans de la variété Lane's Prince Albert, dont voici quelques caractéristiques radiculaires (moyennes de 2 observations).

		Limon					Sable				Argile	
		IX	II	I	XVI		IX	II	I		II	I
Poids total des racines (kg)		5,416	15,174	15,317	27,602		0,94	2,102	4,119		7,177	8,173
Pourcentage pondéral des racines dans la couche	0–34	48	50,5	72,5	75	0–30	87,7	79,6	75,4	0–30	50,2	53,7
	0–50	63,5	66,5	80,0	82					0–50	90,4	78,3

Les porte-greffes présentent des différences importantes de poids total des racines : en sol de limon l'EM IX, faible a 5 fois moins de racines environ que l'EM XVI vigoureux ; le sable accentue cette différence. Par contre, toujours dans le cas des limons les porte-greffes faibles (EM IX) ou moyennement vigoureux (EM II) ont un enracinement plus profond que les porte-greffes vigoureux. Le sol introduit des différences importantes dans le poids total des racines et leur répartition verticale et horizontale. Si l'on considère la moyenne des pourcentages pondéraux des racines contenues dans la couche superficielle de 30 cm, on obtient les chiffres suivants :

sable : 80,9
limon : 61,5
argile : 51,9

On constate que l'extension en profondeur du système radiculaire devient de plus en plus grande lorsqu'on passe du sable aux argiles, les limons ayant une position intermédiaire. Les observations faites dans la Sarthe sur franc concordent avec ces résultats.

L'extention latérale des racines varie en sens inverse : dans le sable elle est 2 à 3 fois celle des branches, tandis qu'elle l'est seulement 1,5 fois pour l'argile et le limon. Enfin, le poids total des racines est fortement réduit dans les sables. Il est à ce sujet

significatif de constater que, quel que soit le porte-greffe le rapport du poids des parties aériennes des arbres au poids des racines est sensiblement constant pour un type de sol (Rogers et Vyvyan 1934) :

sable : 0,8
limon : 2,5 environ
argile : 2,1

Ces rapports qui sont une grossière mesure de la fertilité du sol montrent l'étroitesse des relations qui existe entre les racines et les parties aériennes de l'arbre.

Dans d'autres essais (Rogers, 1946 ; Coker, 1958), des porte-greffes EM I, II et IX ont été comparés sur 5 types de sol de texture fine. Les pourcentages pondéraux moyens des racines existant dans les 30 premiers cm sont donnés ci-dessous :

Porte-greffe → Type de sol ↓	EM I	EM II	EM IX	Moyenne
A	76,1	62,9	79,5	72,8
B	69,5	37,6	77,3	61,5
C	43,0	43,3	27,5	37,9
D	54,0	57,6	74,5	62,0
E	35,0	29,1	—	
Moyennes	55,5	46,1	—	

l'EM I tend à avoir un enracinement plus superficiel qu'EM II, quoique dans le cas le plus net 23,9 p. 100 des racines soient au-dessous de 30 cm. On remarque l'importance des variations introduites par le sol. L'extention horizontale des racines est caractéristique du porte-greffe : elle passe de 12, 8 m^2 pour l'EM IX à 30,4 et 41,3 respectivement pour EM II et EM I. Le classement des vigueurs est le même quel que soit le type de sol. Les rendements en général suivent la vigueur. L'essai précédent permet difficilement de se faire une idée de l'adaptation du porte-greffe au sol. Tout au plus, signale-t-on, par ailleurs, qu'EM IX et EM II ne peuvent pas produire des arbres de taille normale en sol sableux. Du point de vue de l'utilisation de l'eau du sol, tous les porte-greffes utilisent moins bien l'eau aux fortes tensions, mais certains l'utilisent particulièrement mal (EM IV, XII, II) tandis que d'autres l'utilisent beaucoup mieux (EM VII, I, XIII). (Tukey et Brase, 1939). Corrélativement EM I serait plus sensible aux situations sèches qu'EM II (Hatton, 1939).

Les racines des divers porte-greffes montrent des traits caractéristiques (Rogers et Booth 1960) : EM I a beaucoup de racines fibreuses autour du collet ; EM II a souvent des racines tortueuses et un enracinement asymétrique, tandis qu'EM IX a des racines fragiles.

Les porte-greffes du pommier ont des propriétés spécifiques au point de vue enracinement : poids total des racines, extension latérale du système radiculaire, forme générale de l'enracinement... mais cette spécificité ne s'étend que d'une façon très atténuée à la profondeur de l'enracinement. *Dans des conditions identiques les divers porte-greffes exploitent à peu près la même profondeur de sol.* Il n'existe pas de porte-greffes véritablement traçant ou pivotant et c'est en définitive la constitution du profil qui règle la profondeur et la forme de l'enracinement.

4° Constitution de l'échantillon des arbres observés.

La méthode utilisée pour l'étude de l'enracinement se rapproche de la technique de l'enquête. Nous indiquons sur les schémas n° 8 les caractéristiques de l'échantillon constitué pour l'ensemble des arbres étudiés en distinguant la forme utilisée et le type de sol.

Du fait du mode de réalisation de l'enquête (arboriculteurs adhérents d'une Société, pas de tirages au hasard des vergers et des arbres étudiés) cet échantillon peut ne pas représenter correctement l'ensemble des vergers de la Sarthe. Sous cette réserve, il est cependant intéressant de faire certaines remarques.

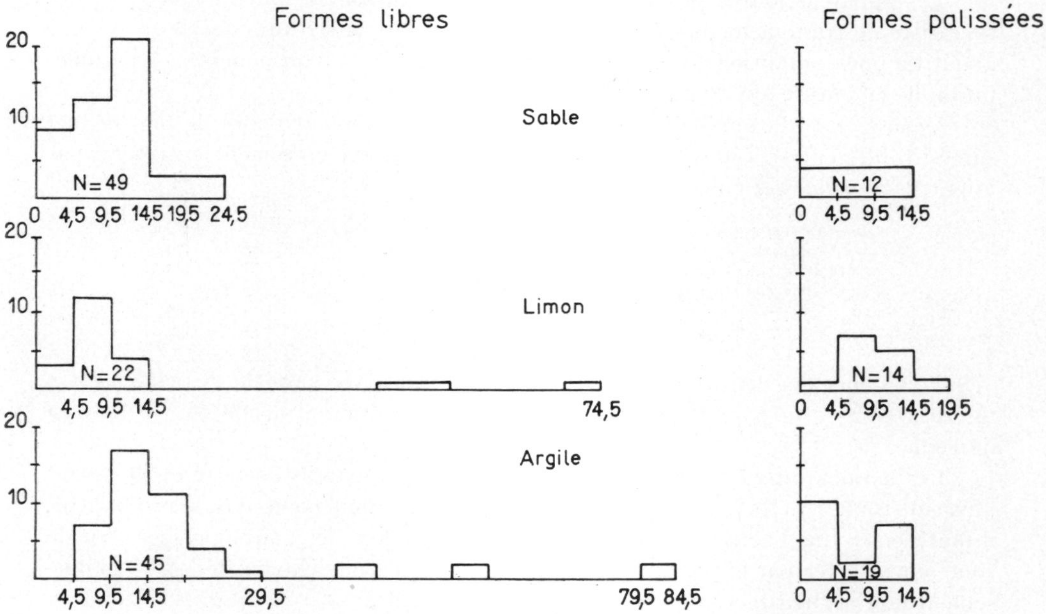


Fig. 8. — *Histogrammes des fréquences des arbres en fonction de l'âge de plantation en 1960.*

a) *Forme et âge des arbres.*

Si pour les formes palissées les plantations sont toutes récentes (âge maximum de 19 ans) elles sont par contre beaucoup plus anciennes pour les formes libres (âges de 84 ans maximum).

b) *Répartition et âge des arbres sur les divers sols.*

Dans le cas des formes palissées les arbres sont à peu près également répartis sur les trois types de sol. Pour les formes libres il y a peu d'arbres plantés sur sol de limon, tandis qu'ils sont nombreux sur sable et argile, sensiblement avec les mêmes fréquences. Mais si l'on considère pour ces deux dernières catégories la répartition des fréquences en fonction de l'âge on constate que quoique les classes modales soient analogues on trouve beaucoup plus d'arbres très jeunes sur sable et beaucoup plus d'arbres plus âgés sur argile. Tout se passe comme si pour les formes libres qui se pratiquent depuis longtemps les plantations avaient été faites d'abord sur argile et ensuite sur sable. Il serait vain de rechercher une cause précise à cet état de fait.

On peut cependant souligner les difficultés soulevées par de tels faits : pour l'ensemble de formes libres on constate que les arbres les plus âgés sont sur les sols les plus lourds ; on voit ainsi apparaître une corrélation âge de l'arbre teneur en argile qui résulte seulement de la structure de l'échantillon. On conçoit ainsi que les « biais » introduits par la constitution même de l'échantillon compliquent le calcul et l'interprétation de régressions multiples sur les plantes pérennes où l'âge du végétal intervient nécessairement.

5° Tassement du sol par le passage d'appareils lourds.

Les appareils lourds produisent un tassement du sol, surtout lorsque pour des nécessités de traitement ou de récolte ils circulent sur un sol humide. Ce tassement aboutit à une diminution de la porosité du sol et par voie de conséquence à l'augmentation de la densité apparente.

Voici à titre d'exemple quelques densités apparentes moyennes de mottes mesurées à différentes profondeurs pour un sol de limon exclusivement entretenu par appareils à disques et cultivateurs :

Zone tassée :	
Croûte de surface	1,74
Partie sous croûte	1,82
Partie sous-jacente, avec matière organique	1,66
Partie sous-jacente, sans matière organique	1,84
Zone non tassée, au-dessous de 15 cm	1,61

Si l'on admet une densité réelle de 2,6 la porosité en p. 100 varie de 38,1 en zone non tassée à 29,2 — 33 pour les parties tassées, soit une diminution de 19,7 p. 100 en moyenne.

Ces actions proviennent surtout du passage des appareils de traitement pesant plusieurs tonnes. Si les pressions transmises diminuent rapidement avec la profondeur, il faut penser que l'action de ces pressions se cumule lors de chaque passage dans la zone non affectée par le travail du sol et à la longue il peut y avoir des effets de tassement non négligeables au-dessous de la zone travaillée.

Le passage dans les vergers surtout sur sol humide d'appareils de plus en plus lourds pose le problème de l'entretien d'une structure satisfaisante en surface. En effet, le bon état structural de l'horizon supérieur conditionne outre l'exploitation propre de cet horizon par les racines l'aération des couches sous-jacentes et l'infiltration de l'eau.

Reçu pour publication en mars 1961.

SUMMARY

THE RELATIONSHIP BETWEEN PHYSICAL PROPERTIES OF SOIL AND GROWTH OF APPLE TREES IN THE SARTHE

The relationship between physical soil properties and trees growth can be studied by a Survey of existing orchards, combining the study of « Cultural profile » with a statistical analysis of results.

This method applied to apple trees revealed the important factors : structural properties, hydromorphy, limestone and water supply.

The factors permit to devise soil indices for orchard establishment, and show how the study of a profite leads to a choice of techniques to be used at planting.

ZUSAMMENFASSUNG

BEZIEHUNGEN ZWISCHEN DEN PHYSIKALISCHEN BODENEIGENSCHAFTEN UND DEM APFELBAUMWACHSTUM IN DER SARTHE.

Das Studium der Beziehungen zwischen den physikalischen Eigenschaften des Bodens und des Baumwachstums kann, für bestehende Obstgärten, durch Anwendung der « Enquêtemethode », erfolgen. Für dies, wird die Untersuchung des « bebauten Profils » ohne Obstgartenbebaung, mit der Deutung der statistischen Resultate kombiniert. Diese für Aepfelbäume angewandte Methode erlaubt es, die hauptsächlichsten Faktoren hervorzuheben : strukturelle Eigenschaften, Hydromorphie, Kalkgehalt, Wasserversorgung.

Dies führte zur Prazisierung der Bodenauswirkungen auf die Anpflanzung eines Obstgartens und zeigte wie die Profiluntersuchung zur Bestimmung der zu benützenden Anpflanzungstechniken führt.

Зависимость между физическими свойствами почв и ростом яблони в департаменте Сарт (Sarthe).

ГРА. Почвенная лаборатория.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Изучение зависимости роста дерева от физических свойств почвы может производиться применяя к существующим садам анкетный метод. Для этого, сопоставляется изучение почвенного профиля со статистическим объяснением результатов. Этот метод, примененный к яблоне, позволил определить важные факторы : структурные свойства, гидроморфию, присутствие известияка, достаточность водоснабжения.

Это приводит к лучшему пониманию той зависимости, которая существует между почвой и посадкой сада, и показывает, как изучение профиля приводит к определению техники, которую нужно применять при насаждении.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARNOUX J. et GRAS R., 1961. Influence de la capacité de réserve en eau du sol sur la croissance du pommier dans le Sarthe. *C. R. Acad. Agric.* (à paraître).

BARBIER G., TROCME S., et coll. 1950. Pédologie des vergers de la région parisienne. Travaux effectués en 1949. *Ann. Agr.*

BOYNTON 1938. Soils in relation to fruit growing in New York State. Tree behaviour on important soils profiles in the Finger lakes area. *Cornell Agr. Exp. Sta. Bull.* **711**.

COKER E. G., 1958. *Root studies* XII, J. Hort. Sc. **33**.

DROUINEAU G., 1941. Dosage rapide du calcaire actif des sols. *Ann Agr.*

GACHON L., 1956. Contribution à l'écologie de la Reinette blanche du Canada en Auvergne. *Ann Agr*, **5**, 2.

GALET P., 1950. Le dosage du calcaire et l'appréciation du pouvoir chlorosant des sols. Communication au Congrès d'Athènes.

GOUNY P., MAZOYER R., 1953. Relation entre la nutrition minérale et les symptômes pathologiques dans la chlorose calcaire. *Ann Agr.*, **4**.

GRAS R., 1960. Influence d'un horizon calcaire sur la vigueur du pommier. *C. R. Acad. Agr.*

GRAS R., 1961. Influence des propriétés structurales du sol sur la croissance du pommier dans la Sarthe (à paraître).

HALLAIRE M., 1957. L'eau. Guide National de l'agriculture (1 vol).

HALLAIRE M., 1960. Le problème du potentiel de l'eau dans le sol et de la disponibilité de l'eau pour la végétation. *Ann de Physiologie Végétale*. **2**.

HATTON R. G., 1939. Rootstock work at East Malling. *Scientific Horticulture*. **7**.

HENIN S., 1956. Influence des facteurs physiques sur l'enracinement des arbres fruitiers. B. T. I., nº 113.

HENIN S., 1957. Travail du sol en arboriculture fruitière. Rapport Général du Congrès Pomologique, Toulouse.

HENIN S., et GRAS R., 1957. Installation des vergers en fonction du sol. B. T. I. nº 135.

HENIN S., et coll. 1960. Le Profil Cultural. Précis de physique du sol. 1 vol.

HENIN S., MONNIER G., et coll. 1958. Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. *Ann Agr.* **1**.
HIDDING A. P., et Van den BERG C., 1960. The relation between pore volume and the formation of root systems in soils sandy layers. 7ème Congrès. *Int. Science du sol.* Madison.
LIWERANT J., 1957. Quelques aspects de problèmes de la fumure en culture fruitière. C. R. Congrès Pomologique, Toulouse.

Von NEUMANN D., 1958. Beitrage zur Statistik der Wuchs und Ertragsleitung von Obstbäumen. *Archiv für Gartenbau.* **4**, I.
PRESTON A. P., 1955. Apple rootstock studies : Malling Merton rootstocks. *J. Pom Hort*, **25**.
ROGERS W. S., and BOOTH G. A., 1959-60. The roots of fruit trees. *Scientific Horticulture*, **14**.
ROGERS W. S., and VYVYAN M. C., 1934. Root studies. Rootstock and soil effect on apple root systems. *J. Pom. Hort.* **12**.
ROGERS W. S., 1946. Growth and cropping of apple trees on Malling rootstocks on five soil series. *J. Pom. Hort*, **22**.
TUKEY H. B., and BRASE K. D., 1939. Behaviour of Malling rootstock in soils of high medium and low moisture content. *Amer. Soc. Hort. Sc.* **37**.
TURC L., 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle : formule climatique simplifiée et mise à jour Ann. Agr. (I).
TURC L., et GOBILLOT Th., 1960. Déficit annuel des précipitations. I carte.

Ann. agron., 1961, **12** (2) 249-269.

631.435. 3 (44)

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES LIMONS DES PLATEAUX DE LA FORÊT DE CHAUX (JURA)

TROISIÈME PARTIE

G. PLAISANCE et H. W. VAN DER MAREL.
Administration des Eaux et Forêts, Dole (Jura).
Institut de Cartographie des Sols, Wageningen, et Laboratoire de Mécanique des Sols, Delft (Pays-Bas).

PLAN DU MÉMOIRE

I. — Interprétation des analyses :

1° Problèmes de méthodologie.
2° Interprétation des divers horizons d'un même profil en forêt de Chaux.
3° Comparaison entre eux de divers sols de la forêt domaniale de Chaux (en particulier sols de vide et de hêtraie voisine).
4° Comparaisons avec d'autres sortes de sols du monde (en particulier sols de loess et sols très argileux).
5° Comparaisons entre les portions de sol marbré et non marbré.
6° Comparaisons entre un sol ordinaire et un sol regradé par les lombrics et les fourmis.
7° Comparaison entre un sol ordinaire et un sol regradé par assainissement.
8° Défauts des sols de la forêt de Chaux (résumé).

II. — La végétation et le sol :

1° Effets de la végétation.
2° Effets du déboisement.

III. — Amélioration des sols de la forêt de chaux

1° Objectifs des améliorations aux divers horizons.
2° Principes des améliorations.
3° Moyens pratiques.

Conclusion

Références bibliographiques

I. — INTERPRÉTATION DES ANALYSES

Les observations et mesures qui ont été faites et décrites dans les deux premières parties appellent des conclusions, d'une part au sujet des techniques de laboratoire, d'autre part et surtout au sujet des sols en place :

1° *Problèmes de méthodologie.*

Nous avons mis en valeur :

a) *L'inconvénient des dessiccations préalables* : des différences de 5 à 20 p. 100 sont à enregistrer sur les diverses caractéristiques du même sol original ou desséché (granulométrie; pH ; pF ; perméabilité ; constantes d'Atterberg ; rH ; elles atteignent parfois 50 à 100 p. 100 le Eh). Il en résulte qu'il faut être très prudent en appliquant au sol en place les résultats obtenus au laboratoire après le séchage habituel.

b) *Densité de l'eau retenue.* : Nos mesures ont confirmé la haute valeur de la densité au voisinage de la surface des particules solides, donc de la totalité de l'eau dans le cas des faibles teneurs.

2° *Interprétation des divers horizons d'un même profil en forêt de Chaux.*

Pour un même profil d'un sol considéré comme typique de la forêt, on constate en descendant :

— une augmentation continue avec la profondeur de la quantité d'argile, sans qu'il y ait de renflement marqué sur la courbe aux horizons médians, ce qui indique qu'il s'agit surtout d'une plus grande richesse de la roche-mère ou d'une formation d'argile par désintégration sur place des minéraux ;

— une diminution de la surface spécifique de 33 m^2/g à 20, puis une augmentation de 20 à 53 m^2/g et parfois 100 m^2/g ; elle est en relation évidente avec la teneur en colloïdes humiques et argileux ;

— une augmentation de la densité apparente de 1,52 à 2,02 (chiffres extrêmement élevés) ;

— une diminution de l'indice de plasticité de 20,9 p. 100 à 14,0 p. 100, puis une augmentation de 14 à 34 p. 100 ou plus, sans différence nette entre non marbré et marbré ;

— une diminution continue du volume des pores de 50 à 40 p. 100 et une diminution du volume des pores libres de 16 p. 100 à 0 p. 100 (eau mobile) ;

— une diminution jusqu'à 15 cm, puis une augmentation de la rétention d'eau à pF 3 ;

— une diminution du pH puis, parfois, dans le cas de bons sols, une légère augmentation en profondeur de 4,7 à 5 : la surface est plus riche en bases en suite des restitutions par la litière (mais seulement dans les sols boisés) ; en profondeur, l'élévation du pH est due aux cations adhérents à l'argile ; elle est surtout nette dans le cas d'argile très lourde en sous-sol (plus de 100 m^2 par gramme).

— une augmentation de l'Eh ;

— une augmentation du rH ;

— une diminution de l'azote de 0,098 p. 100 à 0,028 p. 100, puis une augmentation jusqu'à 0,048 p. 100 ;

— une diminution continue de la teneur en humus (de 2,7 p. 100 ou 6,8 p. 100 en surface, elle tombe à 0,6 p. 100 en profondeur) ;

— une diminution continue du rapport humus /azote de 28 à 12 p. 100 ;

— une diminution de K_2O (0,018 p. 100 à 0,012 p. 100), puis une augmentation jusqu'à 0,018 p. 100 ;

— une diminution de CaO (de 0,016 p. 100 à 0,013 p. 100), puis une augmentation jusqu'à 0,098 p. 100, chiffre encore bien faible ;

— une faible variation de MgO ;

— une augmentation de la capacité d'échange des cations (de 5 à 16 m. e. pour 100 g.) ;

— une augmentation du K fixé, dans la proportion de 1 à 7 ;

— une augmentation de Fe_2O_3 qui peut doubler et de Al_2O_3 qui peut tripler ;

— une augmentation de SiO_2 qui peut doubler ;

— une diminution de la différence SiO_2 — (Fe_2O_3 + Al_2O_3) ;

— une très forte diminution de la perméabilité ; mais elle dépend, il est vrai, de la nature de l'humus (d'arbres feuillus, ou de graminées).

On peut faire les remarques générales suivantes :

1° la plupart des caractéristiques influant sur la fertilité, sont meilleures en surface : la pellicule superficielle est plus riche, mieux structurée comme suite aux restitutions par les feuilles de la litière ; elles présentent ces qualités davantage sous vraie forêt que dans les vides.

2° les horizons profonds ont une certaine richesse minérale (et les propriétés favorables corrélatives) du fait que les racines n'y ont pas encore pénétré et qu'ils ont gardé le stock minéral originel.

3° les horizons médians sont les plus défectueux à tous les points de vue, du fait qu'ils sont tassés et appauvris par les délavages répétés.

Lorsque la densité apparente dépasse 1,8, lorsque le volume des pores est inférieur à 40 p. 100, lorsque le volume d'eau mobile (= volume des pores — volume d'eau à pF 3) est inférieur à 10 p. 100, les racines pénètrent difficilement dans le matériau compact et ont une vie au ralenti.

3° *Comparaison entre eux de divers sols de la forêt domaniale de Chaux.*

Si l'on examine l'ensemble des résultats pour des horizons de profondeur comparable, *on est frappé par l'homogénéité de l'ensemble.* La comparaison attentive des couples faite ci-dessous est convaincante à cet égard. Cette homogénéité laisse supposer qu'il s'agit bien *d'une même couverture pour tout le plateau* ; elle comprend il est vrai, plusieurs couches superposées : c'est donc une roche mère complexe.

Quant à la couverture des pentes, elle est probablement souvent colluviale ou diluviale ; lorsqu'il en est bien ainsi, elle résulte d'un tri et diffère de la couverture des zones horizontales des plateaux restée en place pendant un temps plus long, donc plus altérée.

Si l'on examine un grand nombre d'autres sols de la même forêt et que l'on prête attention aux différences, on constate :

a) *le meilleur comportement des sols plus riches en surface en sable grossier* (200 à 2 000 microns) ; on notera que ces sols sont, en fait, également plus riches (au même niveau) en gros sable fin : en tout cas, sur un sol à 8 p. 100 de sable grossier au lieu de 2 p. 100, on a des fûts plus élancés, une proportion de hêtre plus grande, une régénération plus facile, un peuplement plus stable.

b) *le meilleur comportement de certains sols, comme VIII* 25, *dont le sol profond est formé d'argile plus lourde* (qui est aussi plus riche en cations).

c) Il apparaît évident que de grandes différences entre les divers sols doivent être mises en rapport, non pas avec des considérations lithologiques, mais avec les différences de nature *de la couverture végétale actuelle* (ou ancienne) : l'humus de

chêne, celui de hêtre, celui de charme, celui de molinie semblent bien avoir des propriétés spécifiques ; ce dernier est plus pauvre en P_2O_5 et CaO ; il a une plus forte rétention en eau, d'où de très grandes différences constatées dans la productivité, qui sont probablement dues, en fait, à une mauvaise exploitation du potentiel du sol et non a une infériorité chronique inhérente ; elles agissent en particulier sur deux grandeurs caractéristiques : la densité apparente, la teneur en humus (l'optimum semble être de 3 à 4 p. 100), et sur la qualité de cet humus.

d) une autre explication des différences constatées est la *variation des teneurs en eau* : les sols bruns des pentes tel que I 28 ont une variation de rétention d'eau bien plus faible (voir II^e partie, 4, 2°) ; les arbres n'y souffrent pas de l'excès de sécheresse en été.

Les sols moins intensément marbrés sont intermédiaires : la moindre différence de pente ou d'éloignement du bord du plateau, donc de drainage, peut donc avoir de nettes répercussions.

Deux cas particuliers importants ont été étudiés :

a) *Comparaisons entre un sol de « bon vide » I* 14 *et un sol de « mauvais vide » à vieille molinie fortement installée, II* 14. — Leurs propriétés physiques sont toutes très voisines. Les différences de teneur en CaO, K_2O, P_2O_5 en surface ne semblent pas significatives ; les teneurs en CaO et P_2O_5 des horizons profonds semblent toutefois un peu plus grandes pour le « bon vide ». La différence des propriétés chimiques est faible. C'est donc bien, semble-t-il, à l'humus de molinie que semble imputable des difficultés rencontrées par les forestiers en ce qui concerne la régénération naturelle par semis des bonnes essences, la réussite des plantations artificielles, l'élongation des arbres, la qualité du bois produit. Cet humus engendre une porosité qui fait illusion, mais la perméabilité reste faible, l'abondance de silice est probablement nuisible, la nutrition défectueuse.

b) *Comparaisons d'un sol de trouée à molinie et de la hêtraie voisine située sur le même plateau* (Fourg 2 et Chaux X). — Plusieurs des propriétés ont des valeurs très voisines.

De l'ensemble des chiffres, il ressort donc nettement que ces sols étaient à l'origine les mêmes ; *ce sont les différences de traitement qui ont provoqué la dégradation.*

La teneur en P_2O_5 (mesuré à l'H Cl à 25 p. 100) est beaucoup plus faible pour les molinaies (0,012 p. 100 en II 14), que pour les belles chênaies (0,04 p. 100 en I 14) et les belles hêtraies (0,024 p. 100 en III 1, 0,022 p. 100 en 751) ; mais ceci est très probablement une conséquence plutôt qu'une cause de la nature de la végétation.

4° *Comparaisons avec des sols de la forêt de Chaux et d'autres sortes de sols du monde* :

De façon générale, on peut dire que ce sont des sols trop riches en éléments fins non colloïdaux à forte plasticité, donc très sensibles à l'eau ; à C/N moyen (14 en surface et 10 en profondeur) ; à pH moyen (pour des sols forestiers), soit 4,8 en surface et 5,2 en profondeur ; chimiquement pauvres ; à mauvaise aération ; à structure instable.

Il convient de les comparer spécialement à deux sortes de sols :

a) *Comparaison avec les loess.* — La granulométrie est très voisine, ce qui laisse supposer que le limon de la forêt de Chaux est une ancienne formation éolienne. Mais la surface spécifique est moitié moindre et les propriétés chimiques sont inférieures

(le total des bases échangeables est 8 à 10 fois plus petit ; la capacité d'échanges des cations 5 fois plus petite, etc.)

Il n'est pas impossible que ce limon soit un loess décalcifié et altéré après sa chute dans le lac bressan. Ces sols sont moins fertiles que les vrais loess.

b) *Comparaison avec des sols argileux.* — d'après leur détermination granulométrique les argiles du sous-sol sont aussi fines que celles des *tirs* gris, mais la surface spécifique est énormément plus faible (sauf pour le sous-sol de VIII 25 qui est le plus lourd) ; le total des bases échangeables 20 à 40 fois plus faible, sourtout le calcium ; la capacité d'échange des cations 6 fois plus faible ; le rapport SiO_2/R_2O_3 est plus faible. Ils sont donc moins fertiles que les argiles lourdes.

5° *Comparaisons entre les portions de sol marbré dégradé et non marbré d'un même sol*

Il y a une grande différence d'aspect entre deux portions pourtant voisines. On pouvait penser qu'elle correspondait à d'énormes différences de propriété. Or, les analyses montrent *que la plupart de leurs caractéristiques physico-chimiques sont les mêmes* (densité apparente, richesses en bases...) : ceci est très remarquable et montre leur identité originelle. *Leur différenciation est accidentelle et récente.*

Les portions non marbrées montrent quelques caractéristiques légèrement meilleures du fait qu'elles sont plus divisées et un peu plus riches en humus, leur capacité d'échanges en cations est nettement plus grande ainsi que la différence $SiO_2 — R_2O_3$.

De cette faible différence, on peut induire légitimement *que la marmorisation à la différence de la podzolisation, est un mal remédiable.*

6° *Comparaison entre un sol ordinaire et un sol regradé par les lombrics et les fourmis*

Après passage dans le tube digestif d'un lombric la surface spécifique est doublée ; la teneur en humus 7 fois plus forte, celle en azote 7 fois plus élevée, celle en calcium 30 fois plus forte ; celle en P_2O_5 5 fois plus grande. Seule la teneur en K_2O est la même. Ce sont donc justement les éléments faisant défaut dans le sol ordinaire qui se sont accrus. Cet enrichissement en N, Ca et P explique bien les belles réussites de nos cultures en pot sur déjections de lombrics.

Pour la terre de fourmilière les chiffres sont intermédiaires ; la teneur en P_2O_5 est triplée, celle en azote est sextuplée.

7° *Comparaison entre un sol ordinaire et un sol regradé par assainissement naturel*

Dans les parties démarmorisées du sol de monticule (ancien sous-sol assaini aéré et colonisé par la végétation) les propriétés physiques semblent améliorées ; il y a une certaine division et restructuration, un léger enrichissement en humus. Le néosol semble bénéficier aussi de la richesse relative du sous-sol dont il provient, à moins que ce soit l'amélioration physique qui retentisse sur l'amélioration chimique.

8° *Défauts des sols de la forêt de Chaux*

A) *Défauts physiques.*

1° *Défauts agissant sur les racines.* — La battance du sol de surface ; le manque d'épaisseur meuble, le faible volume des pores *diminuent l'aération* de l'ensemble du profil. Il en résulte une vie difficile pour les racines. Pour que celles-ci vivent normalement, il faut un volume d'air supérieur à 40 p. 100 et un volume d'eau mobile supérieur à 10 p. 100.

On notera en passant que les analyses courantes portent sur des échantillons brassés : elles bloquent dans des moyennes des chiffres en réalité différents pour les fractions brunâtres et grisâtres d'un même échantillon : dans la nature les racines cheminant dans le sol rencontrent tantôt une fraction, tantôt l'autre ; le milieu physico-chimique est donc très hétérogène ; les racines choisissent d'ailleurs leur tracé en fonction de ces différences locales de dureté et d'hygrométrie (plutôt dans les parties grises) ; c'est une des raisons pour lesquelles elles sont sinueuses. Des études de micropédologie seraient utiles pour préciser les conditions microécologiques.

En période pluvieuse, surtout si la température est basse, la couche supérieure est parfois satisfaisante, mais la couche inférieure est gorgée d'eau : les racines végètent ou même pourrissent ; en période sèche, la couche inférieure serait acceptable, mais la couche supérieure se déssèche à l'excès, l'eau y est retenue avec un pF trop élevé.

D'autre part, par suite du mauvais tamponnage hydrique, il y a dans le sol des variations de teneur en eau trop brusques ; les racines ne peuvent s'adapter à ce régime trop contrasté. Ces défauts sont accrus les années à printemps humide et été sec, surtout si les pluies ne sont pas réparties régulièrement. Ces défauts sont spéciaux aux sols en position de plateau.

2° *Défauts agissant sur l'évolution du sol.* — Les alternances d'excès d'humidité et de sécheresse s'il y a découvert, ont aussi des répercussions sur l'évolution du sol lui-même : les premiers provoquent l'effondrement de la structure ; les seconds provoquent probablement une cimentation irréversible des colloïdes par suite de leur polymérisation.

B) *Défauts chimiques* :

Il faut constater la grande pauvreté, surtout en éléments nutritifs fondamentaux de K, P et Ca ; elle concorde avec le fait que les peuplements considérés localement comme à « belle futaie », n'ont en réalité qu'une qualité « moyenne » si on les compare aux très belles forêts françaises feuillues.

Une exception favorable à cette pauvreté générale est constituée par les sols spéciaux étudiés : sol de fond d'étang, sol de fourmilière et surtout déjections de lombrics.

On sait qu'une forêt montre peu d'exigences quant au sol ; les prélèvements annuels, comparés à ceux des cultures agricoles y sont très faibles ; l'exportation annuelle par ha (si la litière est conservée sur place) est d'environ 3 à 8 kg de K_2O, 4 à 15 kg de CaO (pour *Fraxinus excelsa* jusqu'à 35 kg de CaO), 0,6 à 2 kg de MgO, 1 à 3 kg de P_2O_5, 3 à 8 kg de N (V. BECKER DILLIGEN 1939, LEYTON 1948, GESSEL et SCHAREEFF 1958, BAULE 1959, OVINGTON 1959). Pour la pomme de terre, on trouve environ 150 kg de K_2O, 75 kg de CaO, 20 kg MgO, 45 kg de P_2O_5, 100 kg de N.

Pour des céréales, environ 70 kg de K_2O, 15 kg de CaO, 10 kg de MgO, 30 kg de P_2O_5 et 60 kg de N.

Cependant, sur les pépinières forestières qui nourissent un million de plants ou plus à l'hectare, et sur les jeunes régénérations (plus de 10 000 plants à l'ha) les prélèvements sont plus élevés et surpassent même ceux de la pomme de terre.

Le résultat d'une fertilisation dépend de la durée de la sécheresse pendant la période critique pour les plantes (point de flétrissement temporaire pF 4,19). Aussi l'absorption de P et de K, éléments qui sont les plus nécessaires à la croissance des arbres (déjà peu abondants en forêt de Chaux) est, de plus, freinée par temps sec.

Elle dépend aussi de la pénétration plus ou moins profonde et des ramifications plus ou moins développées, donc de l'ameublissement mécanique ou de la présence de racines antérieures. Ainsi les *Hevea brasiliensis* en terres latéritiques très pauvres, mais très perméables, et situés sous climats très pluvieux (avec saison sèche courte ou nulle) ont des racines jusqu'à 3 à 4 mètres de profondeur. Ils produisent autant que les *Hevea* de terres alluviales basses qui sont humides et très riches chimiquement, mais qui ne permettent l'enfoncement des racines qu'à 15 ou 20 cm de profondeur. On y trouve les mêmes racines du type superficiel que celles des chênes situés sur les sols à similigley de la forêt de Chaux. Du fait que la profondeur des racines varie énormément on a procédé ces derniers temps en sylviculture comme en arboriculture fruitière (et aussi en agriculture) à l'analyse des feuilles au lieu de celle des sols (NEMEC 1940, AALTONEN 1950, WHITE 1954, LEYTON 1948, 1955, 1956, ROTH et COPELAND 1957, VAN COOR 1956, 1957, WITTICH 1957, 1958, THEMLITZ 1958, WEHRMANN 1958).

Des *analyses de feuilles* faites sur des échantillons pris en forêt de Chaux par la Société Commerciale des Potasses d'Alsace ont indiqué que c'était surtout les teneurs en CaO et P_2O_5 qui étaient inférieures dans les feuilles d'un chêne « en pommier » comparé à un autre sur bon sol (CaO 0,98 p. 100 au lieu de 2,07 et P_2O_5 0,23 p. 100 au lieu de 0,33 p. 100) ; ils ont montré la pauvreté de la molinie en CaO (0,34 p. 100), et la richesse du charme même au bord d'un vide (I, 26), ce qui le fait considérer comme un regradateur de sol.

D'autres analyses de feuilles faites par la Station Agronomique de Dijon ont montré que parmi des chênes rouges d'Amérique plantés, les mieux réussis sont ceux qui ont la plus forte teneur en CaO (1,29 p. 100 contre 0,89 p. 100) et en P_2O_5 (0,31 contre 0,22). La molinie est pauvre en Ca, Mg, K, P_2O_5 : elle a donc à la longue une action appauvrissante sur les horizons supérieurs.

C) *Défauts physico-chimiques* :

L'état humique défectueux est pour certains de ces sols un défaut grave ; ils ont tantôt une teneur insuffisante en humus (sous chênaie), tantôt une teneur excessive et une qualité mauvaise (sous moliniaie). Les teneurs en eau et air lui sont liées. A propos de sols de la forêt de Chaux, on constate une fois de plus le lien étroit qui relie les propriétés physiques et les propriétés chimiques, et on soupçonne les répercussions de chacune sur l'autre.

D) *Défauts biologiques* :

La microflore et la microfaune sont pauvres : des mesures antérieures (1953) l'ont montré nettement. Cela résulte de la pauvreté en cations et de l'acidité, du mauvais

état de l'humus, des conditions asphyxiantes, des variations trop brusques de la teneur en eau. Il en résulte que la nutrition des racines en souffre puisqu'elle dépend étroitement de la micropopulation. Mais celle-ci peut être améliorée en agissant sur l'humus et l'asphyxie.

II. — LA VÉGÉTATION ET LE SOL

1° *Effets de la végétation*

Tous les défauts signalés ci-dessus sont atténués par la véritable végétation forestière, c'est-à-dire une végétation à *couvert fermé*. Celle-ci a cinq effets principaux :

1° *L'effet-parapluie.* — Le feuillage retient 20 p. 100 d'eau évaporée sur les feuilles et la litière 25 p. 100 (une partie évaporée, une partie absorbée s'il s'agit d'une pluie survenant après une période sèche) : la nappe perchée reste donc plus mince. D'autre part le couvert agit comme *pare-choc* et empêche le tassement par les gouttes des averses.

2° *L'effet-parasol.* — Il ralentit l'évaporation du sol, conserve en période sèche la fraîcheur nécessaire aux racines, empêche la cimentation des colloïdes du sol par dessication.

3° *L'effet-pompe.* — On sait que la transpiration évacue 30 à 40 tonnes par hectare et par jour : d'où diminution de la nappe perchée.

4° *L'effet-fouille.* — Il se fait une division, donc un ameublissement naturel.

5° Amélioration de la perméabilité par un *bon humus.*

En définitive, c'est surtout le fait même qu'ils sont découverts et la surabondance d'humus de molinie qui causent les défectuosités forestières des zones claires ou vides de la forêt. Si quelques conditions lithologiques initiales sont assurément à l'origine de la dégradation, il n'en reste pas moins vrai que celle-ci a été très aggravée par les découverts trop fréquents et persistants de la forêt dans le passé.

Le couvert continu maintient une fraîcheur plus constante ; il diminue considérablement l'épaisseur de la nappe aquifère perchée qui apparaît d'ailleurs bien moins fréquemment ; le sol est plus aéré.

On peut en général distinguer plusieurs sortes de propriétés d'un sol :

a) celles qui sont inhérentes à la roche-mère, essentielles, profondes (nature des argiles, granulométrie... etc) : ce sont les *propriétés lithologiques.*

b) celles qui sont principalement fonction de la nature de la végétation (stabilité de la structure...) ; elles sont passagères, contingentes : ce sont les *propriétés phytogéniques.*

c) celles qui sont intermédiaires influencées à la fois par la constitution lithologique et la végétation actuelle (et ancienne) (acidité, perméabilité, microflore...).

En forêt de Chaux, il semble bien que les propriétés différentielles entre sols de vides et sols de forêt normale relèvent de la 2^e^ et 3^e^ catégories. *Les sols de moliniaie ne sont pas essentiellement différents des sols de hêtraie* ; leurs propriétés résultent de l'état *actuel* de la végétation, état qui est lui-même fonction de vicissitudes historiques.

2° *Effets du déboisement*

A) *Envahissement par la molinie.*

Le découvert excessif et l'incendie favorisent la molinie.

Cette graminée *Molinia caerulea* est une grande herbe atteignant 2 m de haut (photo 3 et 4 de la 1ere partie). Elle envahit les trouées et les vides qui sont causés par l'incendie. La molinie possède en outre la propriété d'aimer la lumière, et celle, étonnante, de prospérer d'autant mieux que les conditions hydriques alternantes sont plus accusées (ennoyage hivernal et dessication excessive estivale). Elle possède aussi la propriété de supporter la présence d'un milieu très réducteur et la forte teneur en matière organique des sols à similigley (où se produit l'accumulation d'humus par le manque d'oxygène).

Dès qu'il y a découvert (éclairement supérieur à 20 p. 100) elle s'installe et règne en maîtresse, éliminant les espèces favorables, et ceci d'autant plus que son installation est plus ancienne (grosses touffes appelées ailleurs « touradons »). La surface occupée par la molinie est environ 60 p. 100 de la surface totale de la forêt de Chaux.

La molinie est remarquablement adaptée à des conditions difficiles. S'il y a installation d'arbres, dans la lutte, l'arbre l'emporte. Mais elle réapparaît lorsqu'on récolte le revenu de la forêt, ou donne aux semis la lumière dont ils ont besoin Elle rend ensuite difficile la régénération des graines qui n'atteignent pas le sol et qui souffrent (concurrence pour l'eau et les substances fertilisantes ; action toxique).

Le phénomène d'évincement de la forêt par une robuste graminée, quand la forêt est détruite, est également connu dans plusieurs autres pays. Un exemple est la vaste plaine de Padang Lawas (100 000 ha) à Sumatra-Sud, qui est complètement envahie par l'*alang-alang* (*Imperata arundinacea*). Pendant la mousson sèche sévissent constamment des incendies qui ne peuvent être arrêtés que par des pluies accidentelles naturelles. Aussi la superficie de cette plaine désolée s'étendra de plus en plus tant qu'un reboisement n'y aura pas été installé. Autrefois, il y avait des forêts touffues ; des cultures et des prairies s'y rencontrent encore de nos jours, ainsi que des ruines de temples hindous datant du treizième siècle. C'est un exemple de transformation qui n'est pas absolument irréversible, mais la réversibilité suppose la suppression de toute action nocive.

B) *Propriétés nocives de l'humus de molinie.*

1° une accumulation trop grande de matière organique à décomposition lente (*anmoor*) : elle retient prisonnière l'eau qui, de cette sorte, n'est plus disponible pour les végétaux ligneux.

2° diminution de la perméabilité, donc de la circulation de l'eau. Celle-ci acquiert des propriétés asphyxiantes (d'où une modification de la microflore) et réductrices (d'où une action sur les minéraux, car Fe et Al deviennent plus mobiles). Cette faible perméabilité de la couche supérieure, a des répercussions sur les horizons sous-jacents.

3° l'humus de molinie est plus pauvre en Ca, P, K, que l'humus forestier : les couches superficielles ne bénéficient donc plus comme sous forêt des remontées par le circuit feuilles-litière du stock minéral du sous-sol ; peu à peu la couche superfi-

cielle s'appauvrit et n'assure plus la nutrition des racines qui se trouvent à son niveau, en particulier celles des semis et jeunes végétaux ligneux.

C) *Effets propres du découvert* :

1) Il augmente la quantité d'eau totale entrant dans le sol et s'arrêtant sur le lit imperméable : cette quantité est presque doublée.

2) Il y a tassement par les pluies de la couche superficielle, donc obturation du profil. La conséquence est double, l'évaporation à l'extérieur est ralentie par l'écran ainsi formé, l'eau s'accumule en nappe perchée ; elle nuit au sol et aux racines par son excès même. D'autre part, elle s'enrichit en gaz carbonique et acquiert ainsi des propriétés réductrices et asphyxiantes.

En résumé, lorsque la forêt est remplacée par la moliniaie, il se produit des modifications dans la couche superficielle (compacification et appauvrissement), dans la couche médiane (compacification, détérioration par les solutions réductrices, marmorisation, appauvrissement par lessivage latéral) et un appauvrissement biologique général de tout le profil. La molinie est bien un véritable fléau comme l'avaient pressenti les forestiers praticiens.

III. — AMÉLIORATION DES SOLS DE LA FORÊT DE CHAUX

1°) *Objectifs de l'amélioration* :

Ainsi donc les objectifs à atteindre sont : rendre la structure plus aérée et plus stable ; provoquer la résorption de l'excès de matières organiques de molinie ; restreindre dans le temps et en épaisseur l'importance de la nappe aquifère perchée ; réaliser les conditions permettant aux racines de descendre plus bas et atteindre les stocks disponibles inattaqués de substances minérales du sous-sol.

On pourrait envisager deux sortes d'améliorations de l'ensemble sol-peuplement : celles qui concernent seulement le peuplement et celles qui concernent seulement le sol.

En fait, la plupart sont étroitement liées : ce sont souvent les mêmes qui ont un double effet : celles qui concernent le peuplement sont celles qui assurent un couvert plus complet et plus constant. Nous envisagerons surtout ici celles qui sont relatives aux sols. Pour les étudier complètement, il faut distinguer :

A) *Celles qui concernent la couche supérieure meuble.* — Il faut améliorer la *stabilité de la structure* et éventuellement, si possible, la qualité de cette structure ; on y sera aidé par un bon humus, en favorisant la petite faune édaphique, et en favorisant l'extension des racines : l'action est relativement aisée.

B) *Celles qui concernent la couche moyenne.* — Il faudrait réaliser la démarmorisation au moins partielle : elle est lente et s'effectue de proche en proche à partir de la surface, au moins jusqu'à une certaine profondeur limite. Il faut d'ailleurs éviter la remarmorisation qui, elle, est rapide. C'est semble-t-il, une loi de la nature que les améliorations soient toujours plus lentes que les dégradations.

C) *Celles qui concernent la couche inférieure.* — Il faudrait lui faire *perdre sa dureté* excessive, et l'ameublir, lui donner une certaine activité biologique : une action directe sur ce défaut n'est pas très facile en forêt.

2°) *Principes des améliorations* :

A) *Améliorations physiques* :

a) *Régulation de l'eau du sol.* — C'est la plus importante à réaliser. Elle doit consister en une double amélioration :

1° éviter l'excès (saturation) ; elle ne concerne pratiquement que les horizons inférieurs à 15 ou 20 cm ; elle est surtout utile au printemps ; elle est obtenue par ouverture de fossés d'assainissement, par restructuration, par pompage végétal.

2° éviter les excès de dessiccation en période estivale : concerne les horizons 0-20 cm ; elle est obtenue par couvert suffisant, par restructuration (action de l'humus). En somme, il faut allonger le plus possible les périodes où le taux d'humidité est favorable, donc de valeur moyenne. Des expériences précises, non relatées ici, ont montré que l'effet d'un fossé se fait sentir à courte distance et qu'elle est très limitée en épaisseur ; par des fossés seuls on ne peut pas faire disparaître la nappe perchée, on ne peut malheureusement que l'abaisser très légèrement et limiter sa durée.

b) *Restauration de la structure.* — Elle doit être double :

1° pour la couche meuble : incorporation de matière organique ; favoriser la petite faune par tous les moyens (ombrage suffisant, installation d'arbres dont les feuilles sont appréciées par les petits animaux du sol...).

2° pour la couche dure : l'entrouvrir par sous-solage ou par pénétration de racines d'essences rustiques (aune blanc...).

B) *Améliorations chimiques (minérales et organiques).*

a) *Relèvement des ressources chimiques.* — Substances assimilables, apport de K, de P, de Ca.

b) *Résorption de l'humus* de molinie et changement de qualité de l'humus.

C) *Améliorations biologiques* :

Peut s'obtenir généralement de façon indirecte : c'est une conséquence des améliorations physiques et chimiques. Elles favorisent au maximum le développement d'une microflore aérobie, des lombrics et arthopodes ; ils diviseront et aéreront le sol, ils rendront assimilables les substances fertilisantes. Les engrais biologiques ont donné, en pots, d'excellents résultats.

On ne peut guère actuellement envisager sérieusement les infestations systématiques par des apports d'animalcules ou de cultures bactériennes. Mais il est certain que les populations du sol s'amélioreront dès que les conditions de vie physicochimiques auront été améliorées par voie naturelle ou artificielle.

D) *Observations générales sur les améliorations.*

1° Le *climat* a un rôle important : de fortes pluies d'été et de faibles pluies d'hiver seraient préférables, mais nous n'avons aucun moyen d'action sur ce facteur.

2° Le rôle décisif à la *végétation* : tous les autres moyens ne sont que des *auxiliaires* destinés à activer la végétation forestière qui reste l'agent véritablement efficace de restauration du sol ; elle seule peut, par l'extension des racines, donner au sol la structure désirable ; elle seule assure un couvert protecteur et un pompage

suffisant. L'assainissement, la fertilisation chimique et biologique n'apparaissent que comme des adjuvants, d'ailleurs fort utiles.

3° L'impossibilité d'obtenir des résultats efficaces avec une seule amélioration : c'est l'*ensemble* des conditions de structure d'aération, d'activité biologique qu'il faut réformer ; d'ailleurs tous ces facteurs sont étroitement liés.

3°) *Moyens pratiques*

A) *Moyens naturels.*

C'est avant tout le vieillissement des peuplements :

a) *augmentation du couvert.* — Les taillis vieillis couvrent mieux le sol ; de même les grands arbres soigneusement réservés en plus grand nombre. La conversion en futaie est une nécessité.

b) *les vieux arbres réservés longtemps*, (au delà de 150 ans) sont capables, avec le temps, de lancer des racines dans les couches profondes jusque-là stériles ; elles deviennent meubles et fertiles. Cette constatation va à l'encontre des données classiques de la rentabilité forestière. Pour motif pédologique il convient donc d'adopter un âge d'exploitabilité nettement plus élevé que celui de l'optimum économique.

Seule la végétation arborescente remplit le quadruple rôle de *parapluie, parasol, pompe, fouilleuse.*

Il faut bien entendu, bannir les exportations de brindilles, feuilles, herbes, qui, autrefois, étaient annuelles et qui appauvrirent grandement le sol ; elles sont heureusement abandonnées ; il est indispensable que tout ce qui n'est pas gros matériel ligneux fasse retour au sol.

B) *Moyens artificiels relatifs à la végétation* :

a) *Elimination de la molinie* par un couvert plus dense : nous avons vu en effet qu'elle est par elle-même un agent nocif pour le sol.

b) *Elimination du chêne* qui, en particulier a cause de son tannin, en milieu d'eau stagnante, dégrade lentement le sol par les propriétés très réductrices.

c) *Installation d'essences améliorantes.* — Essences définitives (chêne rouge d'Amérique), ou essences pionnières et transitoires (aunes), ou essences subordonnées ; il faudrait des essences à fort pompage (qui d'ailleurs ont en même temps le couvert le plus dense) et à feuilles se décomposant rapidement pour donner un bon humus, nourrissant une petite faune abondante.

Le hêtre a un fort pompage ; sa litière ne se décompose pas très vite ; il est vrai que le maintien d'une certaine litière est favorable de par sa fonction-écran.

Le pin Weymouth a, de toutes les essences, la croissance la plus forte sur ce genre de sol.

Le douglas semble bien venir si toutefois la marmorisation n'est pas très forte.

Le pin sylvestre a déjà donné de bons résultats depuis 90 ans, mais il n'élimine pas assez bien la molinie, car son couvert est clair.

Le chêne rouge d'Amérique est un excellent pompeur (grande surface foliacée), mais il ne semble bien venir que si le sol est préalablement très ameubli.

Le charme a une action excellente, mais il vient mal dès qu'il y a une nappe perchée fréquente.

L'aune glutineux est utile, mais il supporte mal les sécheresses de l'été.

Le peuplier ne convient pas du fait que le sol est mince et pauvre, et surtout du fait que l'eau stagne.

d) *Culture et enfouissement d'engrais verts*, en particulier de lupin : cette question est à l'étude ; malheureusement le lupin semble mal supporter l'ombre.

C) *Moyens artificiels auxiliaires* :

a) *Assainissement.* — Il est assez difficile car le sol retient fortement l'eau de la nappe perchée. Les effets sont manifestes, mais après une période assez longue, 8 à 10 ans. On a réalisé en 1949 des fossés espacés de 2,50 m. Par suite du prix de revient élevé, il faut se contenter d'un fossé tous les 10 m.

On notera que BLÜMEL, en agriculture, a obtenu par drainage des augmentations de récolte de 14 à 20 p. 100.

b) *Sous-solage.* — Des essais à 40 cm ont été réalisés dans l'axe des bandes pour semis directs de glands de chêne rouge avec une sous-soleuse Fondeur portée par tracteur : un bon résultat est à attendre.

c) *Culture.* — Les passages répétés de fraise rotative, telle que le Rotavator, réalise un bon émiettement (donc l'aération et la combustion de l'humus en excès), en même temps qu'ils détruisent la funeste molinie ; on passe 3 fois dont 1 après un été et 1 après les gelées hivernales.

d) *Formation de billons.* — A partir de la terre ameublie au Rotavator : la surépaisseur permet l'étalement des racines en même temps qu'un bon microdrainage.

e) *Elimination de la molinie.* — Par des cultures répétées, par le trichloroacétate de soude (N A T A), par les hormones (DALAPON, BASINEX).

f) *Amendements.* — Le plâtre a donné de bons résultats à l'échelle expérimentale ; l'effet de la poudre calcaire et de la chaux sont à l'étude. En Allemagne H. RID a constaté pour l'orge sur pseudogleys une augmentation de récolte de 24 p. 100 par chaulage.

Dans l'agriculture on a pu employer avec succès, sur les pseudogleys pauvres des engrais N, P et K (RID 1958). Dans le cas de végétaux annuels dans les parties basses du terrain, le niveau élevé de l'eau en hiver n'était pas un facteur totalement restrictif. Toutefois, les fluctuations des récoltes annuelles sur les sols à pseudogley étaient plus fortes que celles pour les sols ordinaires voisins. C'est surtout pour les pommes de terre et les betteraves qui sont très sensibles à la sécheresse et à l'eau stagnante que les fluctuations annuelles étaient grandes (AREND et al. 1958).

Il va de soi qu'il faut employer pour obtenir de bons résultats sur des sols pauvres en matière nutritive et périodiquement aussi en oxygène et en eau, plus d'engrais qu'en sols normaux (GILBERT et SHIVE, 1942). En arboriculture également on a tiré profit d'application d'engrais non seule ment au point de vue production globale, mais aussi de façon rentable (BECKER-DILLIGEN 1939, WHITE 1954, VAN GOOR 1956, 1957, 1958, WEHRMANN 1958, GESSEL et SCHAREEFF 1958, KOSLOW 1959, BAULE 1959). L'azote surtout avait une action favorable. Mais les déficiences en K et P appellent aussi des apports.

Un mélange satisfaisant de l'engrais avec le sol peut être désormais assuré par l'emploi des motoplanteuses dont les outils rotatifs brassent le sol avant plantation.

L'effet désastreux de la grande sécheresse en été et du manque d'oxygène pen-

dant l'hiver pour les racines peut être partiellement supprimé par des fumures élevées (GILBERT et SHIVE 1942).

g) *Fertilisation chimique.* — En forêt de Chaux, les engrais azotés (nitrate de chaux : 60 gr au m² en deux applications) ont été essayés avec plein succès : des différences de 100 p. 100 sur la hauteur des plants ont été constatées. Ils permettent d'obtenir en pépinière forestière des plants plus forts et à meilleur chevelu ; ils permettent en forêt de favoriser la reprise après transplantation et le départ de la végétation pendant les premières années, donc de diminuer le nombre des dégagements toujours onéreux, de fermer plus rapidement le couvert, de réaliser un fouissement rapide du sol par les racines ; on essaye actuellement le Perlurée, le sulfate d'ammoniaque etc. MUCKENHAUSEN, GERKHAUSEN et KERPEN estiment nécessaire l'apport de phosphore. On a essayé en pépinière le chlorure de potassium (40 gr au m²), le superphosphate (30 gr au m²), les scories Thomas.

Les engrais organiques et biologiques (HUMAUBY,) semblent devoir donner de bons résultats.

CONCLUSION

Les défauts de ces sols sont dus à leur granulométrie très fine mais peu colloïdale, ainsi qu'à une certaine pauvreté chimique en cations.

Ces défauts ont eu des répercussions très aggravées (structure, état hydrique...) par suite des traitements forestiers défectueux. Ce sont des sols malades, guérissables à la longue : la forêt qu'ils portent doit être considérée comme *convalescente*.

Une végétation forestière très couvrante et donnant une forte dépouille bien décomposable est le principale remède. L'extension naturelle du bouleau, du hêtre, l'introduction artificielle de pin Weymouth, chêne rouge d'Amérique, aune et hêtre sont des mesures qui s'imposent. Des auxiliaires sont l'assainissement par fossés, la culture du sol, les amendements physiques et biologiques, les engrais chimiques ainsi que l'élimination artificielle de la molinie.

REMERCIEMENTS

Pour la participation aux analyses qu'ils ont faites, nous tenons à remercier les Laboratoires de l'Ecole nationale des Eaux et Forêts, de la Société commerciale des Potasses d'Alsace, de la Station agronomique de DIJON dont les Directeurs et les Chimistes ont bien voulu étudier nos échantillons avec sollicitude.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF THE TERRACE LOAMS ON THE PLATEAUX OF THE CHAUX FOREST (JURA).

Besides the constantly moist or too dry soils, there exists a group of pseudo-gley soils which have been little investigated and which exhibit rather variable properties. A striking example is offered in the Chaux forest covered with old soils on residual plateaux ; these possess a very compact subsoil and are subject to periodical waterlogging which results in a recent marbling below the surface, in addition to the ancient marbling at greater depths. This process leads to a defective vegetation with damaged trees and unforested spaces.

The process of marbling or its possible reversion are affected by various factors which are discussed.

The properties of the pesudo-gley soils of the Chaux forest are described. The fine fraction, Atterberg constants and specific surface of the soils increase with depth, but there is little difference between plots carrying good or poor stands of trees. The apparent density of the soils increases with depth, but there is no marked difference between samples of marbled soils and adjacent non-marbled ones.

Soil permeability is poor, in spite of the high porosity, and water retention is generally excessive. The soils are not too acid, but processes of reduction are rather marked. Chemical analysis shows a low cation-exchange capacity and low amounts of exchangeable cations especially in the leached central horizons of the profile. The soils are poor in nutrients and became strongly altered during the long history of their formation.

The actual faults appear to be ephemeral and are mainly due to the mor-type humus associated with past occurrences (coppice-with-standards system of exploitation, various abuses, forest fires, etc.) and with a lack of vegetal cover also due to forest exploitation.

Principles and practices of a combined restoration of soils and vegetation are discussed. They involve the improvement of the humus on the one hand, and a possible reversion of the marbling process on the other ; this may be a global (physico-chemical and biological), progressive and slow process, but it is necessary and profitable.

The vegetation is the more active and more economical factor of soil improvement ; the re-population of insufficiently forested areas should be promoted by various silvi cultural and agronomical techniques. The first results obtained after 130 years in the III, VI and X series only by silvicultural methods warrant good results, but modern techniques should do even better within a shorter period of time.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUM STADIUM DER DECKLEHME DES WALDES VON CHAUX (JURA).

Neben den Böden welche eine dauerhafte Feuchtigkeit aufweisen und denjenigen welche dauernd trocken sind, besteht eine Bodenkategorie von Similigleyen (Pseudogleyen) die bis zur Stunde, kaum einer Untersuchung ihrer wechselhaften Eigenschaften unterworfen wurden. Der Wald von Chaux liefert uns ein treffendes Beispiel : es handelt sich um alte Böden auf Ueberbleibsel von Hochebenen Sie besitzen einen sehr kompakten Untergrund und zeigen eine periodische Vernässung (zeitweilig sitzende Grundwasser). Hierdurch erfolgt eine rezente, der Oberfläche nahe liegende Marmorisierung welcher sich eine, in der Tiefe liegende, ältere Marmorisierung hinzugesellt.

Es entsteht eine schadhafte Vegetation (schlechte Bewaldung sowie durch Molinia besiedelte Lücken welche aus älterer, nicht angebrachter Behandlung und teilweise auch aus Bodenmängel entstanden sind).

Die Marmorisierung sowie Entmarmorisierung stehen unter dem Einfluss verschiedener Faktoren welche präzisiert werden.

Es erschien als eine Notwendigkeit die Bodeneigenschaften der Similigley des Waldes von Chaux näher zu erforschen.

Die Korngrössefeinheit, die Konstanten nach Atterberg sowie die spezifische Bodenoberfläche nehmen mit der Tiefe zu, jedoch bestehen, zwischen zwei Parzellen, die eine gut, die andere schlecht beholtzt sind, nur wenige Unterschiede. Die scheinbare Dichte nimmt mit der Tiefe zu, doch bestehen keine nennenswerte Unterschiede zwischen benachbarten marmorisierten und nicht marmorisierten Proben.

Die Durchlässigkeit ist gering, doch ist sie besonders niedrig für Böden mit Molinia und dies trotz einer erhohten Porosität : ein solcher Zustand ist besonders ungünstig. Die Wasserbindung ist im allgemeinen zu stark. Diese Böden sind nicht sehr sauer. Die Reduktionsprozesse hingegen treten stark hervor. Die chemische Analyse zeigte den niedrigen Wert der Kationenaustauschkapazität sowie den geringen Gehalt an austauschbaren Basen, dies besonders für die mittleren, ausgewaschenen Horizonten. Es sind nährstoffarme Böden ; sie wurden stark verändert im Laufe ihres langen Bestehens.

Die zur Zeit bestehenden Mängel, scheinen vorübergehender Natur zu sein, die in der Hauptsache, von der Humusart der Molinia abhängen ; hieraus ergeben sich die historischen Begebenheiten (Behandlung als Mischwald, verschiedenartige Missbräuche, Brände...) sowie der gegenwärtige Mangel an Bedeckung welcher ebenfalls an die Waldbehandlung gebunden ist.

Die Prinzipien sowie die Praxis zu einer gemeinsamen Wiederherstellung der Böden und des Bestandes werden erforscht. Sie bedinge neinerseits eine Humusverbesserung, andererseits eine teilweise Entmarmorisierung welche als möglich erscheint. Sie kann nur global (physikalisch, chemisch und biologisch), fortschreitend und langsam sein. Jedoch erscheint sie als wünschenswert und rentabel.

Um eine Restauration des Bodens herbeizuführen, erscheint es als wirksamstes und zugleich wirtschaftlichstes Mittel die Vegetation zu benützen. Doch muss dieselbe durch verschiedene waldwirtschaftliche Methoden und agronomische Hilfsmittel unterstützt werden, um das ungenügend bedeckte Gelände zu besiedeln.

Die ersten nach 130 Jahren, durch zu Hilfenahme von waldwirtschaftlichen Methoden erzielte Resultate in der III, VI und Xten Serie bilden eine Erfolgsgarantie. Durch Anwendung moderner Verfahren ist es möglich besser und rascher zum Ziel zu gelangen.

Вклад к изучению лимонов плоских возвышенностей известкового леса. (Юра.)

Г. ПЛЕЗАНС и Х.В. ВАН-ДЕР-МАРЕЛЬ, ДОЛЬ (Юра) и ДЕЛЬФТ (Голландия).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

Наряду с почвами постоянно влажными и постоянно сухими, существует категория почв с ложным глеем, которые до последнего времени были плохо изучены и которые имеют свойства переменные. Известковый лес дает поразительный пример; это — старые почвы на остаточных плоских возвышенностях. Они имеют очень плотную подпочву. Они подвергаются периодическому переувлажнению. Это является причиной недавней подповерхностной марморизации которая прибавляется к марморизации глубокой, более старой.

Это обусловливает плохой рост (деревья попорченные, дуплистые, с молинией, что происходит отчасти от способа эксплуатации и отчасти от недостатков самой почвы).

Марморизация и демарморизация зависят от различных причин, которые определены.

Было необходимо указать точно свойства почв с ложным глеем известкового леса. Размеры почвенных частиц, константы АТТЕРБЕРГА и специфическая поверхность увеличиваются с глубиной, но между двумя участками, из которых один имеет хороший лес, а другой-плохой, разница мала. Кажущаяся плотность увеличивается с глубиной, но нет значительной разности между образчиками марморизированными и соседними, не марморизированными.

Водопроницаемость плохая, но она особенно мала в почвах с молинней, несмотря на скважистость довольно высокую : это обстаятельство является неблагоприятным. Удержание воды вообще слишком сильно. Эти почвы не очень кислы. Наобором, здесь очень сильно выражены восстановительные процессы.

Химический анализ показал низкий уровень обменной способности катионов и незначительное количество обменных оснований, особенно в средних горизонтах, выщелоченных. Это-почвы бедные питательными элементами; они были сильно изменены в течение продолжительного прошлого.

Теперешние недостатки кажется временные и зависят главным образом от гумуса молинии, следовательно, от непостоянства в прошлом (метод эксплуатации « en taillis sous futaie »,[1] различные злоупотребления, пожары...), также как и от недостатка растительного покрова, зависящего также от метода эксплуатации леса.

Изучены приняиты и методы одновременного возрождения почв и насаждений. Оно требует, с одной стороны-улучшения гумуса, с другой сторонычастичной демарморизации, которая кажется возможной. Оно может быть только общим (физико-химико-биологическим), последовательным и медленным. Но оно представлястся желательным и доходным.

Впрочем, самый активный и самый экономический агент возрождения почв — это растительность. Тем не менее необходимо ей помочь снова завладеть поверхностью, которую она покрывает недостаточно, при помощи различных лесоводческих методов и различных вспомочательных агрономических приемов. Первые результаты, достигнутьле после 130 лет в третьей, шестой и десятой сериях являются гарантией результата. Современные методы позволяют получить результаты лучшие и скорее.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AALTONEN V. T., 1950. Die Blatt-analyse als Bonitierungsgrundlage des Waldbodens 4, *Internatl. Congr. Soil Sci. Proc.*, **1**, 229-231.

BAULE H., 1959. Die Forstdüngung. *Kali-Briefe*, Fachgebiet 6, Forstwirtchaft, 4, 1959. 8 p.

BAULE H., 1959. Die Rentabilität der forstlichen Düngung. *Kali-Briefe*. Fachgebiet 6, Forstwirtschaft, 4,

BECKER-DILLINGEN J. Die Ernährung des Waldes. Verlagsgesellschaft f. Ackerbau, Berlin 589 p.

BERTRAMSON B. R., STEPHENSON R. E., 1942. Comparative efficiency of organic phosphorus and of superphosphate in the nutrition of plants. *Soil Sci.*, **53**, 215-227.

BLOOMFIELD C. Leaf leachates as a factor in pedogenesis. *J. Sci. Food. Agric.*, **6**, 641-651.

BLUMEL F. Bodengefügeveränderungen durch Maulwurfdränung. *Oesterreichische Wasserwirtschaft*, **8**, 11.

CANNON W. A., FREE E. E., 1925. Physiological features of roots with special reference to the relation of roots in the aeration of the soil. *Carnegie Instit. Wash.*, Publ. 368.

DUCHAUFOUR P. L'utilisation des engrais en forêt. *Rev. Forest. Franc.*, Juin, 385.

FRICKER Cl., 1959. La fumure en sylviculture. *Circ. Inform. Soc. Comm Potasse Alsace*, 164, 64.

GESSEL S. P., SCHAREEFF A., 1957. Response of 30 year old Douglas Fir to fertilization. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **21**, 236-239.

HAMMOND L. C., ALLAWAY W. H., 1955. Effects of oxygen and carbon dioxide levels upon absorption of potassium by plants. *Plant Physiol.*, **30**, 155-161.

HEIBERG S. O., WHITE D. P., 1950. Potassium deficiency of reforested pine and spruce stands in Northern New-York. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* **15**, 369.

KOZLOV V. P., 1959. Restauration of fertility of washed-off grey forest soils by means of fertilizers. *Pochvevedenie*, **6**, 42-46.

LARSON W. E., 1954. Response of sugarbeets to potassium fertilization in relation to soil physical and moisture conditions. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, **18**, 313-317.

LEYTON L., 1948. Mineral nutrient relationships of forest trees. *For. Abstr.*, **9**, 399-408.

LEYTON L., ARMSON K. A., 1955. Mineral composition of the foliage in relation to the growth of Scots Pine. *Forest Sci.*, **1**, 210-218.

LEYTON L., 1956. The relationship between the growth and mineral composition of the foliage of Japanese larch (Larix leptolepis Murr). *Plant and Soil*, **7**, 167-177.

MÉRIAUX S., GILLY G., 1958. Considérations pédologiques sur le Val de Saône. *Ann. Agron.*, **5**, 593-636.

MÉRIAUX S., GILLY G., LAMONTRE B., 1957. Sur le lessivage des sols de la plaine de la Saône. *Bull. Assoc. Fran . Et. Sols*, 715-727.

NEMÈC A., 1940. Zur Kenntnis der Kali-und Magnesiummangelerscheinungen bei Sämlingen und Kulturen der Kiefer. *Forstwiss. Centralblatt*, 160-166.

RID H., 1958. Die Stellung der Pseudovergleyten Böden im Acker-und Pflanzenbau. *Congr. Internation. Sci. Sol, Hamburg*, 90-111.

PLAISANCE G., Les assainissements par les moyens mécaniques. *Rev. Forest. Fran .* 553-563.

ROTH E. R., COPELAND O. L. Uptake nitrogen and calcium by fertilized shortleaf pine. *J. Forestry*, **55**, 281-284.

RUSSEL M. B. Soil aeration and plant growth. IN SHAW B. T. : *Soil physical conditions and plant growth.* Chapter IV, New-York.

SCHATZ A. C. N., SCHATZ V., TRALAWNY G. S., 1954. Chelation (Sequestration) as biological Weathering factor in pedogenesis. *Proc. Penn. Acad. Sci.*, **28**, 44-51.

THEMLITZ R., 1958. Beobachtungen zum Kalk-Kali-Antogonismus bei jungen Nadelholzpflanzen. *Kali Briefe*, Fachgebiet 6, Forstwirtschaft, 1 Folge, 12.

VAN GOOR C. P., 1957. Bemesting van fijnspar in heide-bebossingen. *Stikstof*, **14**, 62-68.

VAN GOOR C. P., 1956. Potassium deficiency as a cause of yellow tip disease in Scots pine. *Korte Meded. Bosbouwproefsta. T. N. O.*, n° 25, 31.

VAN GOOR C. P., VAN LAAR A., 1958. De Bestandes begründung der Douglasie. Nederl. *Bosbouwk. Tijdschrift*, **30**, 67-83.

VOGEL F., 1953. *Landw. Jahrb. Bayern.*, Sonderheft, 50.

WALLACE A., NORTH C. P., MUELLER R. T., ACMAIDAN N., 1953. Chelating agents as a means of supplying micronutrients to wooden plants in alkaline and calcareous soils. *Proc. Amer. Soc. Hortic, Sci.*, **62**, 116-118.

WEHRMANN J., 1958. Mineral Stoffernährung von Kiefernveständen in Bayern. *Proc. Congr. Internatl. Sci. Sol, Hamburg*, **1**, 271-278.

WEINSTEIN L. H., ROBBINS W. R., PERKINS, H. F., 1954. Chelating agents and plant nutrition. *Science*, **120**, 41-43.

WITHE D. P., Variation in the nitrogen, phosphorus and potassium contents of Pine-needles with season, crown position and sample treatment. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, **18**, 326-330.

WHITE D. P. Aerial application of potash fertilizer to coniferous plantations. *J. Forestry*, **54**, 762-768.

WIERSMA, D., MORTLAND M. M., 1952. Response of sugar beets to peroxide fertilization and its relation to oxygen diffusion. *Soil Sci.*, **75**, 355-360.

WITTICH W. Stand und Aussichten der förstlichen Düngung. *Phosphorsäure*, **17**, 42-49.

WITTICH W., 1958. Die Bedeutung der Düngung in der Forstwirschaft. *Der Forst und Holzwirt.*, **13**, n° 16.

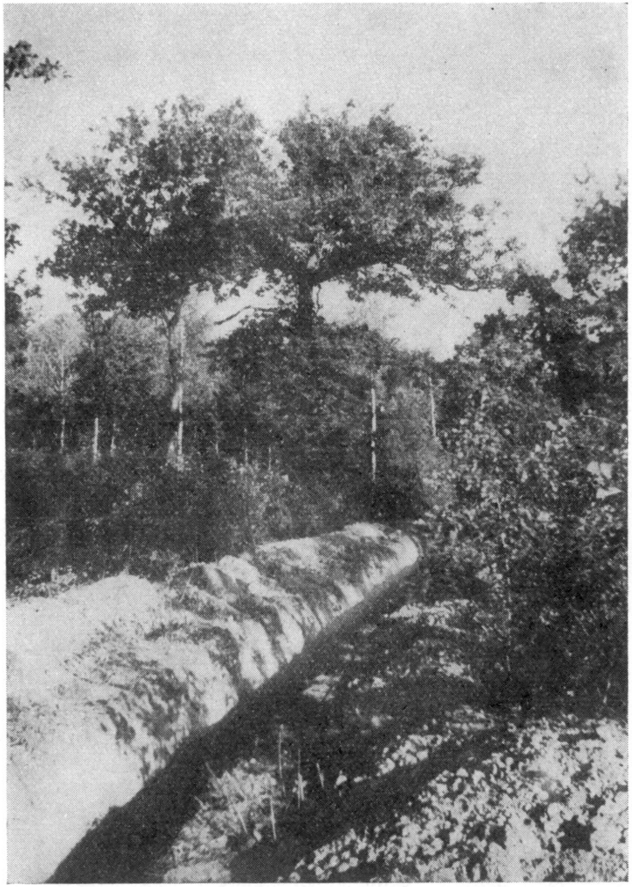


Photo 1. — *Fossé ouvert à la main dans une zone clairiérée ; chêne rouvre en pommier.*



Photo 2. — *Hêtraie résultant de conversion par simple vieillissement ; la jeune futaie est très bien venante et la molinie a disparu complètement ; le peuplement est en équilibre ; la production ligneuse est satisfaisante.*



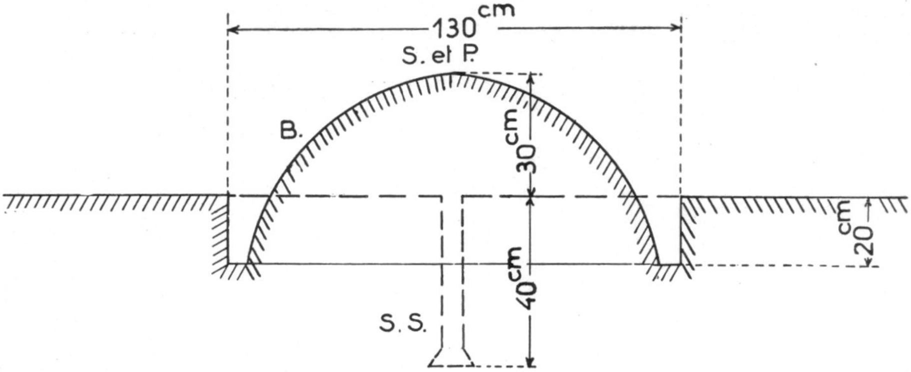
Photo 3. — *Peuplement de 53 ans de chênes rouges d'Amérique : fûts élancés, molinie éliminée, croissance excellente.*



Photo 4. — *Peuplement de pins Weymouth en mauvais sol.*

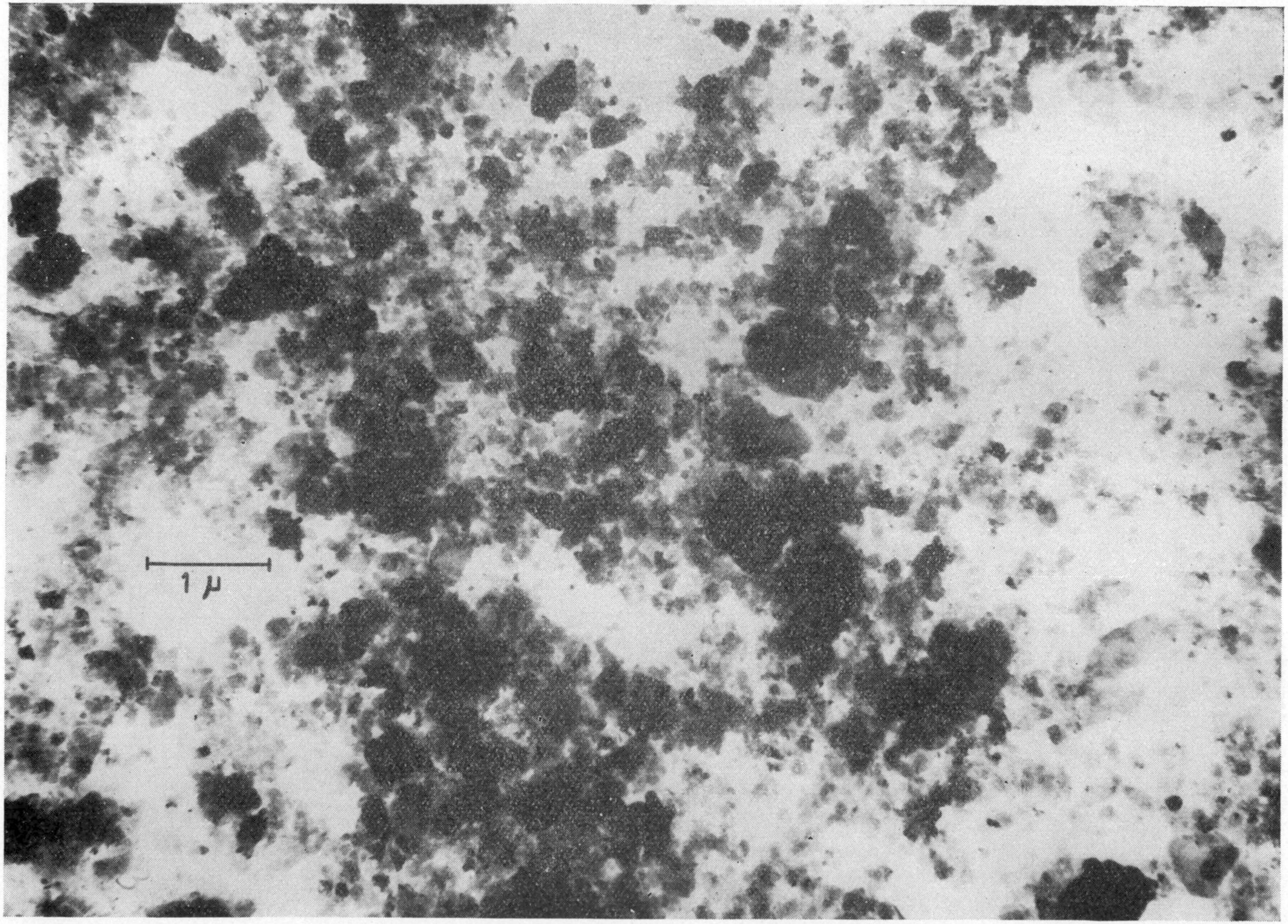


Photo 5. — *Billons exécutés à la charrue à double soc.*



L — Largeur de 1,30 m ameublie par le Rotavator, sur une épaisseur de 20 cm.
B — Bourrelet obtenu par deux passages inverses de charrue.
SS — Sous-solage.
S et P — Semis directs de glands (S) alternant avec plantations (P) de résineux dans l'axe du bourrelet.

Croquis. — *Schéma de billon après passage de Rotavator et sous-solage.*
(Projet incomplètement réalisé actuellement)



La photo au microscope électronique montre la fraction < 2 μ du sol marmoroïde situé à l'intérieur d'un monticule (— 40 cm). Elle contient un très grand nombre de particules de gœthite (opaque), et de fines particules d'argiles à lamelles (aspect floconneux). — Voir pour détail des autres types de la forêt l'article sur les argiles minéralogiques de la forêt de Chaux. Les auteurs se font ici un agréable devoir de témoigner leur reconnaissance à M. l'Ingénieur P. KROMER, Directeur de l'Institut de Microscopie Electronique de l'Ecole Technique Supérieure de DELFT (J. E. M.-Delft).

Le Directeur-Gérant : M. L. CAGNAC.

Imprimerie BUSSIÈRE à Saint-Amand (Cher), France. — 12-10-1961.

Dépôt légal : 4e trimestre 1961 *N° d'impression : 910*

RÉSUMÉS DES ARTICLES PARUS DANS LES ANNALES AGRONOMIQUES, 1961, vol. 12, n° 1.

I. N. R. A. PARIS

RÉSUMÉS DES ARTICLES PARUS DANS LES ANNALES AGRONOMIQUES, 1961, vol. 12, nº 1.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 5-11.

LE PROBLÈME DES IRRIGATIONS DE COMPLÉMENT. PERSPECTIVES DE DÉVELOPPEMENT, INFLUENCE SUR L'AMÉNAGEMENT DES EAUX, NÉCESSITÉ ET OBJECTIFS D'UNE EXPÉRIMENTATION

A. DARLOT

Les irrigations de complément dans les régions dites « humides » de la France sont appelées à prendre une grande extension. Elles sont, en effet, susceptibles non seulement de contribuer à l'accroissement de la production mais aussi et surtout, en palliant l'irrégularité de la pluviométrie, cause essentielle de la variabilité des rendements, à réduire les prix de revient unitaires des produits récoltés et à régulariser la production, cette régularisation apparaissant essentielle pour permettre d'orienter valablement la production agricole et faciliter les opérations de conditionnement et de commercialisation. En outre, l'irrigation doit permettre de valoriser les autres facteurs de production mis en œuvre.

Le développement des irrigations de complément s'est d'ailleurs déjà largement amorcé en France et les études entreprises ont permis de préciser leur possibilité d'extension sur la base de données agricoles et climatiques. La mobilisation de l'eau nécessaire pour satisfaire les besoins correspondants exigera la mise sur pied d'un programme d'aménagement rationnel des eaux qui tiendra compte de l'incidence des aménagements sur le plan hydrologique et qui prendra en considération tous les autres besoins.

Des expérimentations systématiques s'avèrent nécessaires pour définir avec précision ces besoins et les modalités optimales de l'irrigation en fonction de critères économiques. Des dispositifs expérimentaux ont déjà été mis en place et devront permettre de disposer des éléments d'informations nécessaires à la mise en place d'aménagements rationnels.

THE PROBLEM OF SUPPLEMENTARY IRRIGATION. PROSPECTS OF DEVELOPMENT ; EFFECT ON WATER MANAGEMENT ; NEED FOR AND SCOPE OF EXPERIMENTATION

Supplementary irrigation in the « humid » regions of France is bound to be extended over large areas. It will not only contribute to an increased production, but it will mitigate the irregularities of rainfall incidence and the consequent irregularities in yields, and thus decrease the cost of production of crops and regulate production. This is indispensable for an economical orientation of agricultural production and for facilitating agricultural operations and commercialisation ; furthermore, irrigation should promote the utilization of other factors of production.

The development of supplementary irrigation is greatly encouraged in France and its study has shown that it can be extended under the agricultural and climatic conditions prevailing. The mobilization of waters required for satisfying this need necessitates the introduction of a rational water-management which will take hydrological and other needs into consideration.

Systematical experimentation is needed for the precise determination of requirements and of the optimum economic conditions of irrigation. The experiments already designed should furnish the informations required for the introduction of rational management practices.

DAS PROBLEM DER ZUSATZBEWÄSSERUNGEN. ENTWICKLUNGSAUSSICHTEN, AUSWIRKUNG AUF DIE WASSERVERSORGUNG, NOTWENDIGKEIT UND ZIELE EINER VERSUCHSANORDNUNG

Die Zusatzbewässerungen der sogenannten « feuchten » Gegenden Frankreichs sind dazu berufen eine grössere Erweiterung zu erfahren. In der Tat, sind dieselben geeignet, nicht nur allein einen Ertragsanstieg zu bewirken, sondern auch die Unregelmässigkeiten der Niederschläge zu beheben welche die hauptsächlichste Ursache der Ertragsunterschiede darstellen ; dies würde zu einer Erniedrigung der Erzeugungskosten der geernteten Produkten sowie zu einer Produktionsregulierung führen. Eine solche Regulierung erscheint als wesentlich, die landwirtschaftliche Produktion auf gültige Weise zu orientieren und die Konditionierungs-und Kommerzialisierungsoperationen zu erleichtern. Ausserdem, soll die Bewässerung dazu beitragen die anderen, aufgebotenen Produktionsfaktoren zu begünstigen.

Die Ausdehnung der Zusatzbewässerungen hat in Frankreich, bereits auf grösserer Grundlage begonnen, und die sich im Gange befindenden Studien erlauben es, die Möglichkeit einer Weiterentwicklung auf der Basis landwirtschaftlicher und klimatischer Gegebenheiten zu präzisieren. Die dazu notwendige Wassermobilisierung welche nötig ist um diesen Bedürfnissen gerecht zu werden, erfordert ein rationelles Wasserversorgungsprogramm welches sich, auf die zu erwartenden Auswirkungen auf hydrologischer Ebene beruft und ebenfalls anderen Bedürfnissen gerecht wird.

Systematische Versuche sind notwendig um mit Genauigkeit diese Bedürfnisse sowie die optimalen Modalitäten der Bewässerung zu bestimmen, und dies in Verbindung mit den wirtschaftlichen Kriterien. Experimentelle Versuchsanordnungen wurden bereits angesetzt, die es erlauben sollen, die notwendigen Informationselemente zu liefern, die der Anlegung einer rationellen Bewirtschaftung gerecht werden.

Проблема добавочных орошений. Перспективы распространения этой системы. Влияние на проблему планировки вод. Необходимость и цель экспериментальных опытов.

А. ДАРЛО (Технический отдел Гидравлики. Главная Дирекция Механизации Сельского Хозяйства).

Добавочные орошения призваны получить широкое распространение в так называемых « влажных » районах Франции. И действительно эти орошения способны не только увеличить урожайность, но и исправить иррегулярность получения почвой дождевых осадков являющуюся главной причиной крупных вариаций урожаев и снизить унитарные цены сельскохозяйственных продуктов урегулировав их, что и является основным фактором правильной ориентации сельскохозяйственной продукции и облегчения ее поступления на рынок.

Кроме того, система добавочных орошений должна позволить пересмотреть многие иные факторы от кото рых эта продукция зависит.

Применение этой системы во Франции началось уже в широких размерах, а проведенные испытания позволили уточнить возможности большего ее распространения на базе местных как сельскохозяйственных так и климатических условий.

Мобилизация воды для соответственных нужд потребует проведения в жизнь программы рационального распределения водных богатств которое в свою очередь должно соответствовать гидрологическому плану страны учитывая также и все иные водные нужды.

Дабы с точностью исчислить все эти нужды так-же как и оптимальные нужды орошений проведенных в условиях наибольшей экономии, необходимы систематические экспериментальные опыты.

Меры к проведению этих испытаний в широких масштабах в настоящее время уже приняты и опыты эти должны позволить собрать информационные данные необходимые для проведения в жизнь рациональной планировки вод.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 13-49.

ÉVALUATION DES BESOINS EN EAU D'IRRIGATION, ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE FORMULE CLIMATIQUE SIMPLIFIÉE ET MISE A JOUR (ETp, f. 60)

L. TURC

a) des études antérieures sur l'évaporation en milieu non irrigué (bassins de cours d'eau et cases lysimétriques) nous ont permis d'ajuster des formules pour évaluer cette évaporation en fonction principalement de grandeurs météorologiques : ce sont les formules I, II, III. La formule III est la plus complète ; établie pour le calcul de l'évaporation du sol et de la végétation par 10 jours, elle fait intervenir, en plus des grandeurs météorologiques, des termes qui traduisent certains caractères de la végétation et du sol (ces termes sont assez faciles à évaluer car en général on n'a pas besoin de les connaître avec précision) ; elle bénéficie des connaissances sur le bilan de l'eau obtenues avec des cases lysimétriques situées sous des climats divers, et de confirmations par les bilans de bassins versants naturels d'Europe, des U. S. A., d'Afrique, d'Indonésie. Cette formule III peut être appliquée aux cas où le sol est bien couvert par une végétation active et abondamment pourvue en eau, elle permet alors d'évaluer « l'évapotranspiration potentielle » : ETp.

b) nous utilisons maintenant ces formules pour évaluer l'évaporation des sols nus, des cultures non irriguées, des milieux naturels. Pour les cultures irriguées par contre nous avons simplifié le calcul ; dans ce cas en effet on peut simplifier la formule III puisque l'approvisionnement en eau et le développement de la végétation n'interviennent plus comme facteurs limitants ; cette simplification fait l'objet du présent mémoire.

On note t la température moyenne de l'air sous abri pendant la période considérée (en °C) et Ig la radiation globale en petites calories par cm² de surface horizontale et par jour pendant la même période.

La formule III, lorsqu'on l'applique au calcul de l'évapotranspiration potentielle, prend deux formes différentes selon que $l = \frac{(t+2)\sqrt{Ig}}{16}$ est supérieur ou inférieur à 10 (voir référence 34) ; chacune de ces formes se simplifie aisément, ainsi dans le premier cas (l supérieur à 10) on obtient fréquemment des valeurs de ETp proches de Emm/10 jours $= \frac{(t+2)\sqrt{Ig}}{11}$ dans le second cas (l inférieur à 10) ETp décadaire est souvent proche de $\frac{(t+2)\sqrt{Ig}}{16}$; on pourrait donner des approximations plus poussées pour chacun des deux cas, mais l'expression

$$\text{ETp mm/10 jours} = 0{,}13 \frac{t}{t+15} (Ig + 50)$$

suffit à elle seule, elle donne, lorsque $l > 10$ comme lorsque $l < 10$, des valeurs proches de celles obtenues avec l'ancien calcul ; dans les cas où il apparaît quelques désaccords entre l'ancienne formule et la nouvelle, c'est que celle-ci s'accorde mieux avec les résultats expérimentaux, en effet la radiation globale, Ig, tient dans la nouvelle formule une place plus importante que dans l'ancienne (sauf lorsque Ig est faible), cette amélioration est devenue opportune depuis que les valeurs de Ig sont mieux connues.

c) exécution des calculs : on a défini plus haut (*b*) les variables t et Ig en précisant dans quelles unités elles sont exprimées.

« h. r. » est l'humidité relative *moyenne pendant un mois*, exprimée en p. p. 100 ; plus précisément c'est l'humidité relative calculée à partir de la pression partielle moyenne de vapeur d'eau pendant ce mois, et de la moyenne mensuelle de la température de l'air sous abri.

Si h. r. > 50, on peut calculer ETp soit par décade soit par mois :

$$\text{ETp mm/10 jours} = 0{,}13 \frac{t}{t+15} (Ig + 50)$$

$$\text{ETp mm/mois} = 0{,}40 \frac{t}{t+15} (Ig + 50)$$

sauf pour le mois de février pour lequel on remplace 0,40 par 0,37 ; lorsque t est inférieur à 0 °C on prend ETp = 0.

Si h. r. < 50, on exécute le calcul par mois, avec la formule suivante :

$$\text{ETp mm/mois} = 0{,}40 \frac{t}{t+15} (\text{I}g + 50) \left(1 + \frac{50 - \text{h.r.}}{70}\right).$$

(0, 37 pour février)

en général « h.r. » intervient faiblement dans le résultat du calcul.

Si I*g* n'est pas mesuré :

1° On peut lire sa valeur sur les cartes de BLACK (référence 3) ou sur celles de BUDYKO (référence 6) ;

2° Lorsque la durée d'insolation est connue, nous évaluons I*g* par la formule :

$$\text{I}g = \text{I}g_{\text{A}} (0{,}18 + 0{,}62\ h/\text{H}) \text{ (cf. annexe 3).}$$

Les valeurs de $\text{I}g_{\text{A}}$ sont données dans l'annexe 1, ainsi que celles de H ; *h* est la durée d'insolation, mesurée en principe à l'héliographe CAMPBELL ; elle *ne comporte pas* la correction de début et de fin de jour (« low sun correction » des auteurs américains) ; *h* et H sont exprimés dans les mêmes unités, *h*/H est l'insolation relative.

d) exemples et résultats :

Deux exemples de calcul sont traités dans l'annexe 2, l'un à Tunis et l'autre à Dujailah (Iraq). Cette annexe donne les valeurs de *t*, I*g* (ou *h*, ou *h*/H), h. r., utilisées pour les calculs dont les résultats sont donnés dans la 5e partie du mémoire. Dans cette 5e partie la formule est éprouvée pour des stations de climats très différents, aux différentes époques de l'année ; on confronte les valeurs calculées avec les valeurs observées par les expérimentateurs ; le dernier paragraphe contient un tableau général qui résume les résultats, et le graphique représentatif ; les ETp s'échelonnent depuis 10 mm par mois au Danemark, en période hivernale, jusqu'à 250 mm par mois en Iraq, en période estivale.

e) conclusion :

La grandeur ETp que nous cherchons à évaluer est plus ou moins bien définie selon les climats ; c'est l'évapotranspiration d'un périmètre irrigué (cette irrigation étant suffisante pour satisfaire largement les besoins de la culture) pendant les périodes où la végétation est active et couvre le sol, c'est-à-dire à l'exclusion des périodes de germination où le sol est encore nu en grande partie, et à l'exclusion des périodes où la végétation est presque morte (céréales après la maturité par exemple).

La formule proposée ici est très simple et les variables utilisées sont généralement faciles à obtenir. La formule a été éprouvée pour des climats très différents, c'est pourquoi on peut admettre avec une grande confiance qu'elle donne des évaluations de ETp avec une erreur inférieure à 15 p. 100 plus de une fois sur deux (près de deux fois sur trois) pour un mois, et plus de deux sur trois (environ trois fois sur quatre) pour des périodes de plusieurs mois ; de tels résultats sont obtenus même lorsqu'on se contente pour la variable I*g* des valeurs lues sur les cartes de BLACK ou de BUDYKO.

ESTIMATION OF IRRIGATION-WATER REQUIREMENTS, POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION : A SIMPLIFIED CLIMACTIC FORMULA EVOLVED UP TO DATE

a) Previous studies of evaporation in non irrigated environment (basins of catchment areas, lysimeters) permitted to adjust formulas for estimating evaporation mainly from meteorological data : these are the formulae I, II and III. The formula III is the most complete : developed for the calculation of evaporation from the soil and by the vegetation during 10 day periods, it contains in addition to meteorological values also factors which express certains characteristics of the vegetation and soil (the evaluation of these is rather easy since it need not be quite precise) ; it is based on the knowledge of water balances obtained in lysimeters under different climatic conditions, and on water balances in basins of catchment areas in Europe, U. S. A., Africa and Indonesia. This formula III may be applied to soils which are covered with an active vegetation well provided with water, and it serves then to estimate the « potential evapotranspiration » : ETp.

b) These formulal are now applied to estimate evaporation on bare soil, non irrigated crops, and in natural environment. The calculation was simplified for irrigated crops : in this case the formula III can be simplified, since the water supply and development of vegetation are no limiting factors any longer ; this simplification is dealt with in this paper. We write *t* for the mean air temperature under shelter expressed as C° for the period considered and I*g* for the global radiation expressed in calories /sqcm of the horizontal surface (mean daily value) during the same period.

Formula III, used for the calculation of potential evapotranspiration, assumes two different

forms according to $l = \frac{(t+2)\sqrt{Ig}}{16}$ being superior or inferior to 10 (see réf 34) ; both formulas are easily simplified, so that in the first case ($l > 10$) ETp values near E mm/10 days $= \frac{(t+2)\sqrt{Ig}}{11}$ are often obtained while in the second case ($l < 10$) the ETp often approaches $\frac{(t+2)\sqrt{Ig}}{16}$; it would be possible to reach a closer approximaticn in both cases, but the expression

$$\text{ETp mm/10 days} = 0{,}13 \frac{t}{t+15} (Ig + 50)$$

is sufficient, giving at $l > 10$, similarly to $l < 10$, values close to those obtained by the old calculation. Where certain differences between the old and new formulae occur, the latter agrees better with experimental results ; global radiation (Ig) has a more important role in the new formula than in the old (except where Ig is very low), and this leads to an improvement, which is now opportune since Ig values are better known.

c) Calculation : the variables t and Ig were previously defined giving the units in which they are expressed.

The h. r. is the *average* relative humidity *during a month*, expressed as percentage ; more exactly, it is the relative humidity calculated from the average value of the partial vapour pressure during the month and from the monthly average of the air temperature (under shelter).

Where h. r. > 50, one may calculate ETp by 10 day periods or by month.

$$\text{ETp mm/10 days} = 0{,}13 \frac{t}{t+15} (Ig + 50)$$

$$\text{ETp mm/month} = 0{,}40 \frac{t}{t+15} (Ig + 50)$$

except for February for which 0,40 is replaced by 0,37 ; ETp = 0 when t is below 0 °C.

Where h. r. < 50, monthly calculation is done by use of the formula :

$$\text{ETp mm/month} = \underset{(0{,}37 \text{ for February})}{0{,}40 \frac{t}{t+15}} (Ig + 50) \left(1 + \frac{50 - \text{h. r.}}{10}\right)$$

the h. r. generally plays only a slight role sie the results of calculation.

Where Ig is not measured : 1° its value may be obtained from the maps of BLACK (refer. 3) or BUDYKO (refer. 6) ; 2° if the duration of insolation is known, Ig is evaluated from the formula :

$$Ig = Ig_A (0{,}18 + 0{,}62\, h/H) \text{ (cf. annexe 3).}$$

The values of Ig_A and H are given in the annexe 1 ; h is the duration of insolation usually measured by the CAMPBELL heliograph, and *does not* contain the correction for the beginning and end of the day (« low sun correction ») ; h and H are expressed in the same units and h/H is the relative insolation.

d) Examples and results. Two examples of calculations are given in the annexe 2, relating to Tunis and Dujailah (Iraq). This annexe gives the values for t, Ig (or h or h/H), and h. r. used for calculating the results reported in the fifth part of the paper. In this fifth part the formula is tried for stations of greatly differring climate, at various periods of the year. The calculated values are compared with experimental values, and the last chapter gives a table summarizing results, and a representative graph ; the values of ETp range between 10 mm/ month for Denmark in the winter period and 250 mm for Iraq in the summer period.

e) Conclusion :

The magnitude of ETp is more or less defined along with the climate ; it represents the evapotranspiration of an irrigated perimeter (the irrigation being sufficient for satisfying best the requirements of crops) during periods of active plant growth when the soil is covered but excluding the period of germination (when the soil is still mostly bare) and periods when the crops is almost dead (e. g. after maturity of cereals).

The formula proposed is very simple, and the variables it contains are generally easily determined. The formula has been tried for rather different climates, and this has shown that the estimation of ETp may be done with an error less than 15 p. 100 more than once in two cases (about twice in three cases) for a month, and more than twice in three cases (about three times in four cases) for periods longer than a month. Such results were obtained even where values of Ig were taken from BLACKS or BUDYKO's maps.

BEWERTUNG DER WASSERBEDÜRFNISSE BEI BEWÄSSERUNG, POTENTIELLE EVAPOTRANSPIRATION : VEREINFACHTE KLIMATISCHE FORMEL UND RICHTIGSTELLUNG

a) Vorausgegangene Studien über die Evaporation in einem nichtbewässerten Milieu (Flussbekken und Lysimeter) erlaubten es uns, Formeln die die Evaporation bewerten anzupassen, und dies hauptsächlichst in Funktion meteorologischer Grössenwerte : es sind dies die Formeln I, II, III. Die Formel III ist die vollständigste ; aufgestellt um die Boden-und Pflanzenevaporation für zehntägige Abschnitte zu berechnen, lässt sie, ausser den meteorologischen Grössenwerten, Glieder intervenieren, welche gewissen Merkmalen der Vegetation und des Bodens gerecht werden (diese Glieder sind leicht bewertbar da man sie im Allgemeinen nicht mit Genauigkeit zu kennen braucht) ; sie ergibt sich auf vorteilhafte Weise aus den, durch Lysymeterversuchen erlangten Kenntnissen, welche unter verschiedenen Klimaten, sich über deren Wasserbilanzen ergeben, sowie aus den vorliegenden Bestätigungen durch Bilanzen natürlicher Wasserbecken Europas, der U. S. A., Afrikas und Indonesiens.

Diese Formel III, kann auch in den Fällen angewandt werden, in denen der Boden mit einer aktiven Vegetationsdecke versehen und gut mit Wasser versorgt ist, dann erlaubt sie, die potentielle Evapotranspiration : ETp, zu werten.

b) Wir verwenden nun diese Formeln zur Bewertung der Evaporation nackter Böden, nichr bewässerter Kulturen, sowie des natürlichen Milieus. Für bewässerte Kulturen hingegen, haben wir die Berechnung vereinfacht ; in diesem Falle kann man die Formel III vereinfachen, da die Wasser versorgung und die Vegetationsentwicklung nicht mehr als einschränkende Faktoren auftreten ; diese Vereinfachung ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

Während der in Frage kommenden Periode, notiert man, unter Strahlenschutz die mittlere Lufttemperatur t (in ^{0}C) sowie, für dieselbe Periode, die Gesamtstrahlung Ig in kleinen Kalorien pro Tag und pro cm^2 horizontaler Fläche.

Wenn man die Formel III zur Berechnung der ETp benützt, so entspricht sie zwei verschiedenen Formen, je nachdem $l = \frac{(t + 2)\sqrt{Ig}}{16}$, grösser oder kleiner ist als zehn (siehe Ref. 34) ; jede dieser Formen ist leicht zu vereinfachen : im ersten Falle ($l > 10$) erhält man häufig ETp-Werte welche nahe ETp/10 Tage $= \frac{(t + 2)\sqrt{Ig}}{11}$ liegen, im zweiten Falle ($l < 10$) grenzt ETp/10 Tage an $\frac{(t + 2)\sqrt{Ig}}{16}$; es war möglich, in beiden Fällen, annäherdere Schätzungen zu erzielen, doch der Ausdruck

$$\text{ETp mm/10 Tage} = 0{,}13 \frac{t}{t + 15} (Ig + 50)$$

kann als ausreichend betrachtet werden, da er im Falle $l > 10$ sowie $l < 10$ Werte ergibt, die denen nach der älteren Berechnungsart erhaltenen Werte, nahe liegen ; in jenen Fällen wo Unterschiede sich zwischen der alten und neuen Formel ergeben, so besteht für dieselbe eine bessere Uebereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen ; in der Tat, nimmt die Gesamtstrahlung Ig in der neuen Formel einen wichtigeren Platz ein als in der alten Formel (ausser Ig sei gering) ; diese Verbesserung der Formel ist angebracht, seitdem die Ig-Werte besser bekannt sind.

c) Ausführung der Rechnungen : unter *b*) wurden die Variabeln t und Ig definiert indem man präzisierte in welchen Einheiten sie ausgedrückt werden. «h. r.» ist die mittlere relative Feuchtigkeit *für einen Monat* und sie wird in p. p. 100 ausgedrückt ; genauer gesagt, handelt es sich um die relative Feuchtigkeit welche aus dem mittleren partiellen Wasserdampfdruck während des betreffenden Monats sowie der mittleren monatlichen, unter Strahlenschutz gemessenen Lufttemperatur, errechnet wird.

Wenn h. r. > 50, kann man ETp pro Dekade oder pro Monat errechnen :

$$\text{ETp/10 Tage} = 0{,}13 \frac{t}{t + 15} (Ig + 50)$$

$$\text{ETp/Monat} = 0{,}40 \frac{t}{t + 15} (Ig + 50)$$

dies, mit Ausnahme des Monats Februar für welchen man 0,40 durch 0,37 ersetzt ; wenn t kleiner als 0 ^{0}C ist, so nimmt man ETp = 0.

Wenn h. r. < 50, wird die für einen Monat gültige Berechnung nach folgender Formel ausgeführt :

$$\text{ETp/Monat} = 0{,}40 \frac{t}{t + 15} (Ig + 50) \left(1 + \frac{50 - \text{h. r.}}{70}\right)$$

(0,37 für Februar).

Im Allgemeinen, interverniert h. r. nur schwach in den, durch diese Berechnung erzielten Resultaten.

Wenn I*g* nicht gemessen wird :

1) kann sein Wert aus den Karten nach Black (Ref. 3) oder denen nach Budyko (Ref. 6) ermittelt werden.

2) ist die Insolation bekannt, so ergibt sich I*g* aus folgender Formel : $Ig = Ig_A\,(0{,}18 + 0{,}62\,h/H)$ (siehe Anhang 3).

Die Werte von I*g* sowie von H werden im Anhang I angegeben ; *h* ist die, mit dem Campbell-Heliograph gemessene Insolationsdauer ; sie *beträgt nicht* die Tages-Anfang und-Ende Korrekturen («low sun correction» der amerikanischen Autoren) ; *h* und H sind in denselben Einheiten ausgedrückt, *h*/H entspricht der relativen Insolation.

d) Beispiele und Ergebnisse : zwei Berechnungsbeispiele werden im Anhang 2 angeführt, das eine für Tunis, das andere für Dujailah (Irak). Aus diesem Anhang sind die Werte von *t*, I*g* (oder *h*, oder h/H), h. r., welche bei den Berechnungen der Resultate verwendet werden (5ter Teil dieser Arbeit) ersichtlich. In diesem 5ten Teil wird die Formel geprüft durch Heranziehung verschiedener Jahresepochen und verschiedenartigen klimatischen Stationen ; die errechneten Werte wurden mit denen durch Experimentatoren beobachteten Werte verglichen ; der letzte Paragraph gibt in einer Gesamttabelle die zusammengefassten Resultate wieder, sowie eine graphische Versinnbildlichung ; die ETp umfassen solche von 10 mm pro Monat für Dänemark (Winterperiode) bis solche von 250 mm pro Monat für Irak (Sommerperiode).

e) Schlussfolgerungen : der zu errechnende ETp-Wert ist mehr oder weniger gut definiert jenach dem Klima ; es handelt sich um die Evapotranspiration eines bewässerten Umkreises (Bewässerung ausreichend um die Bedürfnissen einer Kultur gut zu decken) während Zeitabschnitten, in welchen die Vegetation aktiv ist und den Boden deckt, d.h., mit Ausnahme der Keimungsperioden wo der Boden zum grössten Teil unbedeckt ist und von Zeitabschnitten in denen die Vegetation fast erloschen ist (z.B. Getreide nach Reifung).

Die hier vorgeschlagene Formel ist sehr einfach und die benützten Variabeln sind im Allgemeinen leicht erhältlich. Die Formel wurde für sehr verchiedenartige Klimate ausprobiert und man kann folglich annehmen, dass die erzielten ETp-Schätzungen einer unter 15 p. 100 liegenden Fehlergrenze entsprechen, dies für einen Monat mehr als eine auf zwei Male (annähernd zwei auf drei Male), für mehrmonatige Perioden mehmals zwei auf drei (ungefähr drei auf vier Male) ; solche Ergebnisse können auch erzielt werden, indem man sich mit den aus den Karten nach Black oder Budyko abgelesenen Werte der I*g*-Variabeln begnügt.

Исчисление водных нужд для орошений. Потенциальный эвотранспирационный расход влаги; выведение его упрощенной климатической формулы.

ТЮРК (Лаборатория Почв Версаль).

a. Предидущие опыты над испарением неорошенной среды (водные бассейны и лизиметрические деляни) позволили автору вывести формулы при помощи которых возможно исчисление эвотранспирационного расхода влаги в зависимости главным образом от метеорологических условий. Формулы эти были наименованы I, II и III. Формула III — является наиболее полной; выведенная на базе водоиспаряемости почв и растительного покрова за 10-ти дневный период, она заключает в себе, кроме величин метеорологических, величины указывающие некоторые характерные способности как почвы, так и растений (исчислить эти величины не трудно так как в большинстве случаев нет необходимости знать их с точностью); для выведения этой формулы автором были использованы статистические сведения и водные баллансы полученные в лизиметрических делянках всевозможных климатов, подтвержденные водными баллансами натуральных водоразделов Европы, С. Ш. А., Африки и Индонезии.

Формула III подходит в случаях когда почва прочно покрыта активной растительностью и хорошо снабжена водой; автор находит что в

этих случаях она дает возможность точно исчислить потенциальный эвотранспирационный расход влаги : ET_p.

b. Автор пользуется также этими формулами для исчисления водоиспаряемости оголенных почв или неорошаемых культур в натуральных условиях.

Для культур орошаемых — исчисление упрощено; упрощение формулы III является возможным ибо в этом случае водный режим и развитие растительности не играют роли ограничивающего фактора; упрощение это и является предметом данной статои.

Если означить литерой t среднюю температуру воздуха под прикрытием в течении разсматриваемого периода (в градусах Цельсия) и литерами I_g общее излучение теплоты в малых каллориях на кубосантиметр горизонтальной плоскости в день за тот-же период, то формула III для исчисления эвотранспирационного расхода влаги примет две различных формы в зависимости от того будет-ли $l = \frac{(t+2)\sqrt{I_g}}{16}$ больше или меньше 10 (библиография 34); любая из этих форм легко может быть упрощена; так в первом случае ($l > 10$) очень часто получаются величины ET_p близкие Емм/10 дней $= \frac{(t+2)\sqrt{I_g}}{11}$, а во втором ($l < 10$) десятидневный ET_p даст формулу приближающуюся к $\frac{(t+2)\sqrt{I_g}}{16}$; формула ET_p мм/10 дней $= 0{,}13 \frac{t}{t+15}(I_g + 50)$ достаточна сама посебе ибо даст она как в случаях $l > 10$ так и $l < 10$ — величины близкие к результатам полученным старой системой исчисления, но возможно достичь и болшего уточнения в каждом из двух случаев; несогласcованность-же иногда замеченная между старой формулой и новой не должна смущать, она указывает только на большую приспособляемость новой к экспериментальным результатам; и действительно — общее излучение тепла I_g занимает в новой формуле место гораздо более важное (за исключением случаев когда величина I_g минимальна) чем в старой и улучшение формулы стало актуальным с тех пор, что величины I_g лучше изучены.

c. Применение формул : в параграфе *b* были разсмотрены изменяющиеся величины t и I_g и указаны единицы их выражающие.

Величина « *hr* » — обозначает относительную среднюю атмосферическую *влажность за месяц* выраженную в процентах; более точно — это относительная влажность атмосферы исчисленная на базе среднего давления за данный месяц и средней месячной температуры воздуха под прикрытием. Если величина $hr > 50$ — исчисление ET_p можно вести по декадам, или помесячно :

$$ET_p \text{ мм}/10 = 0{,}13 \frac{t}{t+15}(I_g + 50)$$

или

$$ET_p \text{ мм/месяц} = 0{,}40 \frac{t}{t+15}(I_g + 50)$$

Исключения : февраль, для которого величина 0,40 заменяется 0,37; в случаях когда t ниже $0°$ C — 0 принимается за величину ET_p. Если

величина $hr < 50$ исчисление ведется помесячно и формула представляется следующим образом :

$$ET_p \text{ мм/месяц} = 0{,}40 \frac{t}{t + 15} (I_g + 50) \left(1 + \frac{50 - hr}{70}\right)$$

(для февраля 0,37 вместо 0,40)

В большинстве случаев величина hr имеет слабое влияние на результаты исчисления.

В случаях когда величина I_g — не измерена :

1. Можно ее найти на специальных картах Блака (р. 3) или Будыко (р. 6).

2. Когда длительность инсоляции известна возможно исчислить I_g по формуле : $I_g = I_{gA} (0{,}18 + 0{,}62\ h/H)$ (аннекс 3). Значения I_{gA} также как и величина H указаны в аннексе № 1; h — показывает длительность инсоляции измеряемую в принципе гелиографом Кампбеля; эта величина указана *без поправок* относящихся к началу и к концу дня (« *low sun correction* » — американских авторов); величины h и H выражаются одними и теми-же унитарными определениями, соотношение-же h/H выражает относительную инсоляцию.

d. Примеры и результаты :

Два примера исчисления приведены в аннексе № 2, — первый относится к Тунису, второй к Ираку (Дужайлах). В том-же аннексе указаны числовые величины t, I_g (или h, или h/H) и hr применявшиеся в исчислениях результаты которых помещены в пятой части данной статьи. В этой-же 5-ой части формула испробована в условиях опытных станций различных климатов и в разное время года; результаты исчислений сравниваются с наблюдавшимися экспериментальными результатами; последний параграф содержит общую сводку результатов и полученные графические кривые; различные ET_p распределены от 10 мм в месяц зимой (Дания) до 250 мм в месяц летом (Ирак).

e. Вывод :

Величина ET_p — более или менее определенна в зависимости от климатов; это — эвотранспирационный расход влаги орошенного участка (поливы должны быть достаточны чтобы широко покрыть нужды культуры) в период активного роста растительного покрова когда он совершенно затеняет почву, за исключением периодов проросток, когда почва еще частично оголена, и конца растительности (например — злаки после созревания).

Предлагаемая формула проста и ее варианты — легко получить; формула эта была испробована под различными климатами; поэтому можно с уверенностью сказать что ошибки в исчислении ET_p не превышают 15% более чем в одном случае из двух (около двух — на три) за один месяц, или в двух случаях из трех (приблизительно три раза на четыре) за период в несколько месяцев; соответственные результаты могут быть получены даже при чтении переменных величин I_g на картах Блака или Будыко.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 51-63.

SIGNIFICATION ET PORTÉE AGRONOMIQUE DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE

R. J. Bouchet

ERRATUM

page 55

au lieu de :	$E - C = R_a - \sigma T^4$
lire :	$\lvert E - C \rvert = \lvert R_a - \sigma T^4 \rvert$
au lieu de :	$= 2\,(E - C =$
lire :	$= 2\,(E - C) =$

page 59

au lieu de :	DF déficit de saturation
lire :	ΔF déficit de saturation

L'analyse des paramètres qui interviennent dans la notion d'évapotranspiration potentielle (ETp) permet de dégager d'une part sa signification météorologique (rayonnement net en zone très humide, effet d'oasis en zone sèche, combinaison des deux termes en zone intermédiaire), d'autre part le rôle joué par la couverture végétale (albedo des surfaces d'échanges, régulation stomatique). Il en résulte que ETp en tant que facteur climatique n'est accessible à la mesure que sur une échelle d'espace relativement importante (surface de l'ordre de quelques hectares).

L'étude montre qu'à la notion de ETp on peut faire correspondre la notion de production potentielle de matière sèche pour un végétal déterminé placé dans des conditions écologiqures définies. La comparaison de l'évapotranspiration réelle et de ETp doit permettre de tester dans quelle mesure une couverture végétale utilise toutes les potentialités du climat.

On a constaté qu'en région tempérée ETp pouvait fluctuer largement comme les autres facteurs météorologiques. Il est apparu nécessaire de connaître ETp non à l'échelle du mois mais à celle de la journée pour étudier valablement le problème de la circulation de l'eau dans le sol ou dans le végétal. On a remarqué que même en zone sub-humide et hautement productive comme le Bassin parisien, une certaine divergence se manifestait entre ET réelle et ETp. Il en résulterait une limitation des possibilités d'élaborer de la matière sèche par les plantes. Ce facteur militant de la production végétale en zone tempérée jouerait même en année dite normale et en année sèche il masquerait les potentialités de production dans des proportions qui seraient à déterminer. Ainsi se pose sous un jour nouveau le problème des irrigations de complément.

On a proposé l'étude à l'échelle fine de la journée de ces phénomènes afin de mieux séparer l'action de ETp de l'évapotranspiration réelle maximale et du rôle des surfaces d'échanges (régulation stomatique et échanges gazeux). Ceci afin de s'affranchir du nouveau facteur limitant d'ordre climatique que peut constituer l'évapotranspiration potentielle maximale au cours de la journée. Les solutions du problème pourraient porter soit sur une meilleure utilisation des réserves en eau du sol, soit sur les moyens de réduire ETp max., en diminuant notamment les effets d'oasis par des brise-vents, par une meilleure couverture végétale du sol ou par l'irrigation de vastes surfaces.

Ainsi l'étude de l'évapotranspiration potentielle, agent moteur de la circulation de l'eau, non plus seulement à l'échelle du mois, mais à l'échelle fine de la journée, devrait permettre de mieux analyser les relations plante-climat-sol et surtout de mieux connaître leur interaction. Il devrait en résulter la possibilité de déterminer de nouvelles potentialités de production agricole tout en aboutissant à une meilleure « économie » de l'eau.

THE SIGNIFICANCE AND AGRICULTURAL IMPORTANCE OF POTENTIAL EVAPOTRANSPIRATION

Analysis of the parameters interveneing in potential evapotranspiration (ETp) shows its meteorological significance (net radiation in humid zones. effect of oasis in dry zones, combination of these two in intermediate zones) on the one hand, and the role played by the vegetal cover (exchange surfaces stomatal regulation) on the other. Consequently, the ETp as a climatic factor cannot be measured other than over a relatively large area (surfaces of some hectares extent).

The ETp can be made to correspond with the concept of the potential production of dry matter in a given plant growing under defined ecological conditions. Comparison of the real evapotranspira-

tion with ETp permits the estimation of the extent to which a vegetal cover utilizes all the potentialities of the climate.

It had been observed that ETp may greatly vary in temperate regions, together with other meteorological factors. It is important to know ETp not only on a monthly but also on a daily scale where the problem of water circulation in the soil and plant is being studied. Even in a sub-humid and highly productive zone, such as the Paris basin, there exists a certain divergence between ET and ETp, resulting in a limitation of dry-matter production in plants ; this limitation of vegetal production in temperate zones may even occur in normal years, and would mask the potentialities of production in a dry year, giving a new importance to the problem of supplementary irrigation.

These phenomena were studied on a precise daily scale in order to separate the action of ETp from real maximum evapotranspiration and from the role of exchange surfaces (stomatic regulation and gaseous exchange), with a view to differentiate the climatic limiting-factor which may constitute the maximum potential evapotranspiration during the day. Solution of the problem may lead both to a better utilization of moisture reserves in the soil and to means of decreasing the ETp max. by reducing the oasis effects through windbreaks, increasing the vegetal cover or irrigating over large areas.

Study of the potential evapotranspiration, agent of water circulation, made on a precise daily scale rather than on a monthly basis is better suited for analysing the relationships of plant-climate-soil and for understanding their interactions. This would result in the establishment of new potentialities of agricultural production, leading to a greater « economy » of water.

BEDEUTUNG UND AGRONOMISCHE TRAGWEITE DER POTENTIELLEN EVAPOTRANSPIRATION

Die Analyse der Parameter welche in die Kenntnis der potentiellen Evapotranspiration (ETp) eingreifen, erlaubt es, ihre meteorologische Bedeutung einerseits (Reinstrahlung in sehr feuchten Zonen, Oaseneffekt in trockenen Zonen, Verbindung dieser beiden Glieder in Zwischenzonen), die durch die Vegetationsdecke gespielte Rolle andererseits (Albedo der Austauschflächen, Spaltregulation), hervorzuheben. Hieraus ergibt sich dass die ETp als klimatischer Faktor, nur auf verhältnismassig grösserem Flächenraum (Flächen von einigen Hektaren) einer Messung zugänglich ist.

Untersuchungen zeigen dass die Kenntnis der ETp der potentiellen Trockensubstanzerzeugung einer bestimmten Pflanze, in festgesetzten ökologischen Bedingungen, entspricht. Der Vergleich zwischen wirklicher Evapotranspiration und der ETp soll es erlauben zu prüfen, in welchem Masse eine Pflanzendecke alle klimatischen Potentialitäten zu Nutzen zieht.

Es wurde festgestellt dass die ETp von mässig warmen Gegenden stark schwankt, genau so wie die anderen meteorologischen Faktoren. Es erscheint als eine Notwendigkeit, die ETp nicht pro Monat, sondern pro Tag zu kennen, dies um das Problem der Wasserbewegung im Boden oder in der Pflanze auf gültige Weise zu studieren. Man bemerkt, dass selbst in subhumiden und höchst produktiven Zonen wie das Pariser Becken, sich zwischen der wirklichen ET und der ETp eine gewisse Abweichung zeigt. Hierdurch enstünde eine Einschränkung des Pflanzenerzeugungsvermögens an Trockensubstanzbildung. Dieser in mässig warmen Zonen begrenzende Faktor der Pflanzenproduktion, ist sogar in normalen Jahrgängen spürbar ; in trockenen Jahrgängen verbirgt er, in noch zu bestimmenden Verhältnissen, die Produktionspotentialitäten. So stellt sich das Problem der Zusatzbewässerungen in einem neuen Lichte.

Man schlug die Durchführung feiner, täglicher Studien dieser Erscheinungen vor, um die Wirkung der ETp von der, der wirklichen maximalen Evapotranspiration sowie der, der Austauschflächen zu Teil werdende Rolle (Spaltregulation und Gasaustausch) besser zu trennen. Dies, um sich gegenüber des neuen Faktors klimatischer Ordnung, welcher der potentiellen maximalen Tagesevapotranspiration entspricht, frei zu machen. Die Lösungen zu diesem Problem könnten darin bestehen : bessere Ausnützung der Bodenwasserreserven, Anwendung von Mitteln welche die maximale ETp vermindern ; letztere bestünden in einer Verminderung des Oaseneffekts durch Errichtung von Windschutz, einer besseren Bodenbedeckung durch Pflanzen oder durch Bewässerung grosser Flächen.

So könnte das Studium des wirkenden Teils der Bodenwasserbewegung, d.h. der potentiellen Evapotranspiration, nicht mehr wie bisher im monatlichem, sondern in einem feinen täglichem Masstab es erlauben, die Bezieungen zwischen Pflanze-Klima-Boden zu analysieren, um ihre gegenseitigen Wirkungen besser zu erkennen. Man dürfte zu einer besseren Wasserbilanz gelangen, indem man die Möglichkeit benützt, neue Potentialitäten der landwirtschaftlichen Produktion zu bestimmen.

Агрономическое значение понятия эвотранспирации.

БУШЕ (Центральная Биоклиматологическая Станция — Версаль).

Анализ параметров входящих в состав понятия эвотранспирационного расхода влаги (ET_p) позволяет выделить с одной стороны метеорологическое значение этого понятия (радиация во влажной зоне, эффект оазиса *b* сухой зоне, комбинация этих двух явлений в зоне умеренной влажности), так-же как и роль растительного покрова почвы (альбедо поверхностей обмена, регуляция устьиц). Из этого вытекает что ET_p, в качестве климатического фактора, поддается измерению только в масштабе довольно обширных площадей (несколько гектаров).

Опыт показывает что понятию ET_p может соответствовать понятие потенциональной продукции сухого вещества данным растением поставленным в определенные климатические условия. Сопоставление реального эвотранспирационного расхода влаги с понятием ET_p должно позволить установить в какой мере растительный покров использует все потенциальности данного климата. В районах умеренных было отмечено что величина ET_p поддается изменению в таких-же широких размерах как и все иные метеорологические факторы. Поэтому исчисление ET_p как в масштабе месячном, так и в масштабе суточном стало необходимым для точного изучения проблемы передвижений воды в почве или в растении. Но, даже в зонах досгаточно влажных, зонах высокой продуктивности, как например Парижский Бассейн, отмечено было некоторое различие между реальным эвотранспирационным расходом влаги и величиной ET_p. Результатом этого различия и является должно-быть ограничение возможности формирования растениями сухого вещества. Предполагается что этот ограничивающий фактор зон умеренного климата играет некоторую роль даже в нормальные годы, а в засушливые годы — маскирует потенциальность продукции сухого вещества в размерах пропорционально еще не исчисленных.

Эти гипотезы — освещают совершенно по иному проблему добавочных орошений.

Чтобы вернее отличить действие ET_p от действия реального максимального эвотранспирационного расхода влаги так-же как от роли играемой площадями обмена (регуляция устьиц и газообмен) и освободиться от влияния нового ограничивающего климатического фактора каковым иногда является максимальный суточный ET_p, было предложено изучение этих явлений в масштабе суточном.

Думается что разрешение задачи заключается в лучшем использовании водных запасов почвы, изыскании средств редукции максимального эвотранспирационного расхода влаги, уменьшая наприемр эффект оазиса ветроломными полосами, улучшении растительного покрова почвы и орошении бо́льших площадей земли.

Таким образом изучение потенциального эвотранспирационного расхода влаги — главного двигателя водообращения — не только в масштабе месячном, но в более точном суточном масштабе, поможет проанализировать более точно взаимоотношения растение — климат — почва и лучше изучить их взаимодействие. Результатом этого явится возможность определить новые потенциальности сельско-хозяйственной продукции и провести лучшую экономию влаги.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 65-73.

ÉLÉMENTS SUR LA RENTABILITÉ DE L'IRRIGATION

M. ROBELIN

ERRATUM

P. 67, Tableau 2, 1re colonne, ligne e
lire : *e)* 1959.

P. 71, Tableau 4, 1re colonne, ligne 1
lire : 11 au 25 juillet

Tableau 4, 1re colonne, ligne 2
lire : 25 juillet au 8 août

L'auteur, s'appuyant sur sept essais expérimentaux conduits sur diverses plantes, montre que la production de matière sèche est liée à l'évapotranspiration (ET_V) par des relations de la forme : $R = aET_V - b$ pour toute valeur de ET_V inférieure à l'Evapotranspiration maximum ETP_v. Le terme b correspond en première approximation à l'évaporation directe de l'eau du sol ; la relation tend vers la forme $R = T_v$ si l'on mesure uniquement l'eau transpirée par la plante (T_v).

Ce fait est vérifié quel que soit le stade du développement.

Chaque élément du rendement global reste cependant soumis à des lois moins simples ; la réponse au déficit d'alimentation en eau est alors fonction de la phase de végétation durant laquelle apparait la sécheresse.

ELEMENTS OF PROFITABLENESS IN IRRIGATION

On the basis of seven experiments conducted with different plants, it is shown that dry-matter production is associated with evapotranspiration (ET_v)by the relationships : $R = a\ ET_v - b$ for al ET_v values below the maximum evapotranspiration ETP_v. The b in the formula roughly corresponds with the direct evaporation of moisture from the soil ; the relationship moves towards $R = T_V$ where only water transpirated by the plant (T_v) is measured. This holds true for any stage of plant development.

All the elements of global yield are, however, subject to less simple laws; the response to a deficient water-supply is thus function of the stage of plant growth during which drought occurs.

ELEMENTE ZUR RENTABILITÄT DER BEWÄSSERUNG

Der Autor zeigt, indem er sich auf sieben, mit verschiedenen Pflanzen durchgeführte Versuchs anordnungen stützt, dass die Erzeugung von Trockensubstanz an die Evapotranspiration ET_V), durch folgende Formel gebunden ist : $R = a\ ET_V$ -b, und dies für jeden Wert von ET_V welcher kleiner ist als die maximale Evapotranspiration ETP_V. Das Glied b entspricht, in erster Annäherung, der direkten Bodenwasser evaporation ; indem alleinig, das durch die Pflanze verdunstete Wasser misst (T_V), so neigt die Formel nach der Form $R = T_V$.

Diese Tatsache ist für jedes Entwicklungsstadium bestätigt.

Jedes Element des Gesamtertrages bleibt jedoch weniger einfachen Gesetzen unterworfen ; die Antwort auf den Wasserversorgungsdefizit ist sodann Funktion der Vegetationsphas innerhalb welcher, die Trockenheit in Erscheinung tritt.

Элементы доходности орошения.

Марсель РОБЛЕН (Агростанция Клермон-Ферран).

Основываясь на семи экспериментальных опытах проделанных над различными растениями, автор указывает что выработка растением сухого вещества тесно связана с эвотранспирационным расходом влаги отно-

шением рода $R = a ET_v - b$ в случаях когда величина ET_v не достигает максимальной эвотранспирации ETP_v. Термин b — соответствует приблизительно прямой испаряемости влаги почвой; если-же принять во внимание только количество влаги испаренной растением (T_v) — то отношение приблизится к формуле $R = \alpha T_v$. Этот факт проверен во всех стадиях развития растений. Каждый из составных элементов общей урожайности останется однако всегда в зависимости от законов менее простых; ответ на дефицит водного питания находится тогда в зависимости от вегетативной фазы, во время которой наступает засуха.

Ann. agron,, 1961, **12** (1), 75-80.

TESTS PHYSIOLOGIQUES PERMETTANT DE CONTRÔLER L'ALIMENTATION EN EAU DES PLANTES

S. DE PARCEVAUX

L'irrigation a pour but d'améliorer l'alimentation en eau des plantes. Pour tester son efficacité, on peut utiliser le rendement qui donne une valeur globale, mais aussi des tests physiologiques (mesures de pression de succion, de transpiration et étude de l'ouverture des stomates) qui donnent des indications ponctuelles et instantanées de l'état de l'eau dans la plante.

PHYSIOLOGICAL TESTS FOR A CONTROL OF THE WATER SUPPLY TO PLANTS

Irrigation aims at improving the water supply to plants. Its efficiency may be assessed by yields which provide global values, and also by physiological tests (measurement of suction pressure or transpiration and study of the opening of the stomata) which give precise and immediate indications of the state of water in the plant.

PHYSIOLOGISCHE TESTE WELCHE ES ERLAUBEN DIE WASSERVERSORGUNG DER PFLANZEN ZU KONTROLLIEREN

Die Bewässerung verfolgt das Ziel die Pflanzen mit Wasser zu versorgen. Um deren Wirkung zu prüfen, ist es möglich, den Ertrag, welcher einen Gesamtwert liefert, zu benützen, aber auch physiologische Teste (Messung der Saugkraft, der Transpiration sowie das Studium der Spaltöffnung) welche punktförmige und sofortige Angaben bezüglich des Wassergehaltes der Pflanzen liefern.

Физиологические пробы для проверки водного питания растений.

С. ПАРСЕВО (Центральная Биоклиматологическая Станция — Версаль).

Цель орощений — улучшение водного питания растений. Для проверки эффективности этого способа питания можно или принимать во внимание урожайность дающую общую оценку, или применять физиологические пробы (измерение всасывающего давления, измерение транспирации, изучение раскрытия устьиц) способные дать точные и немедленные указания о количестве воды в растении.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 81-86.

OBSERVATIONS SUR L'IRRIGATION DU DACTYLE EN SOL DE RÉSERVE HYDRIQUE MOYENNE

Suzanne MÉRIAUX et C. PERREY

Une culture de Dactyle hautement fertilisé en sol de réserve hydrique moyenne a reçu une irrigation de complément par doses hebdomadaires calculées à partir de l'évapo-transpiration potentielle après déduction des précipitations.

En raison de l'abondance des pluies à partir de Juin les apports d'eau n'ont été effectués que sur 2 cycles végétatifs. Ils ont entrainé une augmentation de rendement et, de plus, une arrière-action a été constatée.

Les excédents de production s'élèvent à 4 tonnes de matière sèche par hectare pour un apport de 269 mm d'eau.

L'augmentation de rendement est due, d'une part à la croissance des plantes, d'autre part, au maintien en vie de jeunes talles qui n'auraient pu survivre à la sécheresse du printemps.

Par contre, le profil racinaire est nettement moins favorable après irrigation car 80 p. 100 des racines sont répartis sur les 5 cm superficiels.

Les plantes irriguées sont appauvries en azote du fait de la dilution et enrichies en sodium par les quantités de cet élément contenues dans l'eau.

Les exportations sont particulièrement élevées en azote et en potasse.

Sous l'aspect du besoin en eau de la plante, l'effet de l'irrigation s'est traduit par une diminution de la force de succion des feuilles, bien que la valeur minimum de D.P.D. observée reste relativement élevée et que les facteurs météorologiques instantanés aient une action prédominante.

OBSERVATIONS ON THE IRRIGATION OF DACTYLIS IN A SOIL OF MEDIUM WATER STORAGE

Well fertilized *Dactylis* in a soil of medium water storage was given weekly supplementary rrigation, calculated on the basis of potential evapotranspiration minus rainfall.

Due to abundant rainfall from June onwards, water was supplied through two growth cycles only. This increased yields and, in addition, had residual effects.

Excess yields amounted to 4 tons of dry matter per hectare for a water supply of 269 mm.

The increase in yields was due partly to improved growth, and partly to the survival of young shoots which would have perished under drought.

The root system, on the other hand, was much poorer after irrigation, since 80 p. 100 of the roots were distributed in the first 5 cm of soil.

Irrigated plants were low in nitrogen, due to dilution, and rich in sodium supplied by the water.

Nutrient losses were particularly marked in respect of nitrogen and potassium.

In view of the water requirement of the plant, irrigation resulted in a decrease in the suction power of the leaves, though minimum values of D.P.D. remained relatively high and meteorological factors had predominant influence.

BEOBACHTUNGEN ZUR BEWÄSSERUNG VON KNAULGRAS IN BÖDEN MIT MITTLEREM WASSERHAUSHALT

Ein Knaulgrasanbau, in einem stark gedüngten Boden von mittlerem Wasserhaushalt, erhielt nach Ermittlung durch Zuhilfenahme der potentiellen Evapotranspiration und nach Abzug der Niederschlagsmengen, eine errechnete Zusatzbewässerung in Form von wöchentlichen Gaben.

Infolge der hohen Niederschläge im Monat Juni, wurden die Wassergaben nur auf zwei Vegetationszyklen angewandt. Sie hatten eine Ertragssteigerung zur Folge und ferner konnte noch eine Nachwirkung festgestellt werden.

Die Produktionsüberschüsse betrugen 4 Tonnen Trockensubstanz pro Hektar und dies für eine Wassergabe von 269 mm.

Die Produktionszunahme verdankt man, einerseits dem Pflanzenwachstum, andererseits der Erhaltung junger Wurzelschösslinge, welche nicht der Frühjahrsdürre anheim fielen.

Hingegen entsteht nach Bewässerung ein stark ungünstiges Wurzelprofil, da 80 p. 100 der Wurzeln sich in den oberen 5 cm der Krume befinden.

Die bewässerten Pflanzen sind einer Stickstoffverarmung ausgesetzt welche durch eine Verdünnung dieses Elementes entsteht, sowie einer Natriumanreicherung welche sich aus dem Natriumgehalt des Wassers ergibt.

Die Stickstoff - und Kaliausfuhren liegen besonders hoch.

Unter dem Gesichtspunkt des Wasserbedarfs der Pflanze, äusserte sich die Bewässerung durch eine Verminderung der Saugkraft der Blätter, und dies trotz einem beobachteten hochstehenden D.P.D. - Minimalwert ; ausserdem spielten die augenblicklichen meteorologischen Faktoren eine vorherrschende Rolle.

Навлюдения над орошениями ежи в почве с небольшими запасами влаги.

С. МЕРИО и КЛЕТ-ПЕРРЕЙ (Агростанция Дижон).

Культура ежи в хорошо удобренной почве с небольшими запасами влаги получила дополнительный полив недельными дозами, разсчитанный на базе эвотранспирационного расхода влаги, после вычета из этой величины количества выпавших осадков.

В виду обильности дождей начиная с Июня, водные прибавки были распределены только на 2 растительных цикла. Поливы эти вызвали увеличение урожая, а кроме того было констатировано — последействие.

Добавление 269 мм влаги дало 4-х тонное прибавление сухого вещества на гектар.

Прибавка урожая вызвана была отчасти ускорением процесса роста растений, отчасти благодаря сохранению жизненности молодых кущей, которые в противном случае должны были погибнуть от весенней засухи.

С другой стороны в виду того что 80% корней ежи находятся на глубине не более 5-ти сантиметров от поверхности, орошение не позволило улучшить распространение корневой системы.

Кроме того орошенные растения теряют часть своего азота из-за его растворимости, но получают излишек натрия заключенный в воде.

Что-же касается обеспечения растений влагой, то замечено было, что, несмотря на то что минимальная величина Д. П. Д. оставалась относительно высокой и что роль метеорологических факторов данного момента была доминирующей, последствием орошения явилось уменьшение всасывающей силы листьев.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 87-97.

IRRIGATION ET UTILISATION DES RÉSERVES NATURELLES

M. HALLAIRE

Une culture dont le système radiculaire explore une profondeur de sol donnée et invariable dispose d'une quantité d'eau Q (mm). Il apparait parfois préférable d'irriguer avant l'épuisement de cette réserve, la transpiration végétale diminuant au fur et à mesure que le sol se dessèche (courbe C, fig. 1). Ce fait n'est cependant pas général, la transpiration demeurant parfois constante sur une large gamme d'humidité (courbe A, fig. 1).

Les expériences rapportées ici montrent que le facteur responsable d'une réduction de la transpiration végétale est la variation de l'humidité par unité de temps $\Delta H/\Delta t$: La transpiration demeure maximale ou potentielle (courbe A, fig. 4) si la valeur de $\Delta H/\Delta t$, à laquelle elle conduit, demeure faible (cas d'une évapotranspiration potentielle ETP faible ou d'une frange radiculaire profonde) ;

on peut alors tabler sur une réserve utile égale à la réserve totale Q et laisser l'humidité s'abaisser jusqu'au voisinage du point de flétrissement permanent. Au contraire, la transpiration se met à diminuer avant épuisement des réserves Q(courbe C fig.6) quand elle conduit à des valeurs élevées de $\Delta H/\Delta t$; les irrigations doivent alors être assez rapprochées pour que l'humidité demeure toujours voisine de la capacité au champ.

En ce qui concerne par ailleurs le cas des végétaux dont le système radiculaire croît en profondeur, cet allongement met à la disposition de la plante une quantité d'eau journalière q_0 qui, variable avec la vitesse de croissance et avec le sol, est de l'ordre, en moyenne, de 1 à 2 mm/jour. On peut alors se demander si la dose optimale d'irrigation, habituellement exprimée par $\Sigma(ETP - P)$, P désignant les pluies, ne peut être ramenée à $\Sigma(TP - P - q_0)$, ce qui conduirait à laisser croître régulièrement le déficit de q_0 mm/jour (droites D_1 ou D_2, fig. 6).

IRRIGATION AND THE UTILIZATION OF NATURAL RESERVES

A crop, the root system of which invariably penetrates to a given depth in the soil, uses a certain amount of Q mm water. It seems sometimes preferable to irrigate before this reserve is exhausted, since the transpiration of the plant decreases with increasing dryness of the soil (curve C, fig. 1); this is, however, not general and transpiration sometimes remains constant over a wide range of moisture (curve A, fig. 1).

Experimental results show that the factor responsible for the reduced transpiration of plants is the variation of moisture in units of time $\Delta H/\Delta t$: transpiration remains maximum or potential (curve A, fig. 4) if the value of $\Delta H/\Delta t$ is low (low potential-evapotranspiration or deep rooting); in this case one may count with an available reserve equal to the total reserve Q, and lef the moisture content drop to near the permanent wilting point. On the other hand, transpiration begins to decrease before the exhaustion of the reserve Q (curve C, fig. 6) if it leads to high values of $\Delta H/\Delta t$; irrigations in this case must be frequent in order to maintain moisture levels near field capacity.

As far as plants with an increasing root system in the deep layers are concerned, the deep rooting supplies a daily amount of q_0 water to the plant, which varies according to the growth rate and the soil and averages 1-2 mm/day. In this case the optimum rate of irrigation, usually expressed by $\Sigma(ETP - P)$, where P stands for rainfall, could perhaps be adjusted to $\Sigma(ETP - P - q_0)$, letting the deficit of q_0 mm/day to increase (straight lines D_1, or D_2, fig. 6).

BEWÄSSERUNG UND VERWENDUNG DER NATÜRLICHEN RESERVEN

Einer Kultur, dessen Wurzelsystem eine gegebene, unveränderliche Bodentiefe durchzieht, steht eine Wassermenge Q (mm) zur Verfügung. Da die Pflanzentranspiration mit der Austrockung des Bodens abnimmt, erscheint es manchmal wünschenswert eine Bewässerung durchzuführen ehe diese Reserve erschöpft ist (Kurve C, Abbild. 1). Diese Tatsache ist jedoch nicht allgemein, die Transpiration bleibt manchmal unverändert für einen weiteren Feuchtigkeitsbereich (Kurve A, Abbild. 1).

Die hier wiedergegebenen Experimente zeigen, dass der verantwortliche Faktor der Pflanzentranspirationsverminderung, der Feuchtigkeitsveränderung pro Zeiteinheit $\Delta H/\Delta t$ zukommt : die Transpiration verbleibt maximal oder potentiell (Kurve A, Abbild. 4) wenn der Wert $\Delta H/\Delta t$ zu dem sie führt, niedrig bleibt (im Falle einer niedrigen potentiellen Evapotransperation ETP oder eines Wurzeltiefganges); sodann kann man mit einer brauchbaren Reserve rechnen, welche der Gesamtreserve Q gleichkommt und so, die Feuchtigkeit absinken lassen, bis in die Nähe des permanenten Welkepunktes. Wenn die Transpiration zu hohen Werten von $\Delta H/\Delta t$ führt, so nimmt sie hingegen ab und dies, bevor eine Erschöpfung der Reserven Q eintritt (Kurve G, Abbild. 6); sodann müssen die Bewässerungen immer in kurzen Abständen einander folgen, damit eine Feuchtigkeit erhalten bleibe, die nahe der der Feldkapazität liegt.

Was weiterhin die Pflanze mit einem, in die Tiefe gehendem Wurzelwerk betrifft, so stellt dieser Wurzeltiefgang der Pflanze eine Tageswassergabe q_0 dar, welche, verschiedentlich, je nach der Wachstumsgeschwindigkeit und dem Boden, einen mittleren Wert von 1 bis 2mm pro Tag entspricht. Man ist also berechtigt zu fragen, ob die optimale Bewässerungsgabe welche gewöhnlich als $\Sigma(ETP - P)$ ausgedrückt wird (P entspricht der Niederschalgsmenge), nicht auf $\Sigma(ETP - P - q_0)$ zurückgeführt werden kann, was zu einem regelmässigen Ansteigen des täglichen Defizits q_0 mm führen würde (Gerade D_1 oder D_2, Abbild. 6).

Орошение и использование природных запасов.

АЛЛЕР (Центральная Биоклиматологическая Станция — Версаль).

Корневая система данной культуры занимающая определенную и неизменную глубину почвы располагает количеством воды Q (в мм). По мере осушения земли, транспирация растений уменьшается и поэтому орошение становится иногда необходимым до исчерпания этого водного запаса (кривая C, рис. 1). Нельзя однако считать этот факт общим правилом ибо транспирация иногда остается неизменной даже при довольно широких изменениях влажности (кривая A, рис. 1). Опыты, результаты которых разбираются в настоящей статье, доказывают, что ответственным фактором понижения транспирации растений является изменение влажности за единицу времени, то-есть соотношение $\Delta H / \Delta t$; транспирация будет максимальной или потенциальной (кривая A, рис. 4) в случаях когда соотношение $\Delta H/\Delta t$, к которому она приводит, остается слабым (примеры слабого ET_p, или глубокой корневой системы); в этом случае можно считать что водный запас могущий быть использованным растениями равен общему запасу Q и довести уменьшение влажности вплоть до пункта завядания. Напротив, в случаях когда соотношение $\Delta H / \Delta t$ повышается, транспирация растений начинает уменьшаться задолго до исчерпания водного запаса Q (кривая C, рис. 6); в этом случае рекомендуется сократить промежутки между орошениями чтобы влажность не отклонялась от полевой влагоемкости.

Что-же касается растений, корневая система которых проростает вглубь почвы, это продвижение доставляет данному растению суточное количество воды q_o изменяющееся в зависимости от состава почвы и быстроты проростания. Величина эта колеблегся от 1 до 2 мм в день. Спрашивается, не может-ли оптимальная доза орошений выражающаяся обычно формулой ε (ETP — P), в которой P — осадки, быть заменена формулой ε (ETP — P — q_o), чтобы привести к регулярному увеличению водного дефицита на q_o миллиметров в день (прямые D_1 и D_2, рис. 6).

Ann. agron., 1961, **12** (1), 99-107.

ESSAIS D'ÉVALUATION DES BESOINS EN EAU DE CULTURES MARAICHÈRES SOUS CLIMAT MÉDITERRANÉEN

Claire HUGUET

Au cours d'une expérimentation conduite au champ, sur une culture de tomates industrielles, on a étudié l'influence sur la plante et le sol de quatre niveaux d'alimentation en eau. Les doses d'eau appliquées et calculées à partir d'une formule climatique de l'évapotranspiration potentielle, sont prévues de façon à ce que le sol fournisse aux plantes, des contributions théoriques croissantes de 0 à 4 mm par jour, à partir de ses réserves. D'après les bilans de sols en place on a mis en évidence que la contribution réelle du sol est inférieure à la contribution théorique, ce qui peut se traduire par un déficit d'alimentation en eau de la plante.

En ce qui concerne les effets des irrigations, vis-à-vis de la culture, les doses appliquées au cours des deux périodes critiques principales du cycle végétatif, agissent favorablement sur les facteurs du rendement final : grosseur et nombre de fruits. On note, cependant un rendement en fruits s'élevant à 70 p. 100 de l'optimum, lorsque les volumes d'eau fournis, atteignent seulement 30 p. 100 du volume maximum utilisé.

On a montré d'autre part, qu'il existe à un instant donné une relation entre la teneur en eau des feuilles de la culture et la contribution théorique du sol ; cette relation est susceptible de faciliter le réglage du rythme des irrigations.

EXPERIMENTS ON ESTIMATING THE WATER REQUIREMENTS OF VEGETABLE CROPS UNDER A MEDITERRANEAN CLIMATE

In the course of field experiments with industrial tomatoes, the effect of four different levels of moisture supply on plants and soil was studied. The amounts of water were calculated from a climatic formula of potential evapotranspiration and were supplied in a way that the plants should receive increasing daily amounts of 0 - 4 mm water theoretically contributed by the reserves in the soil. By drawing a water balance for the soil, it was found that the real contribution of water from the soil is lower than the theoretical contribution, which may lead to a water deficit in plants.

As far as the effects of irrigation on the plants were concerned, water applied during the two principal critical periods of the growth cycle had favourable effects on size and number of fruits as factors of the ultimate yield. It should, however, be noted that a fruit yield of 70 p. 100 of the optimum was obtained with only 30 p. 100 of the maximum amount of water applied.

There was, at a given period, a relationship between the water content of leaves and the theoretical contribution of water from the soil ; this relationship may be used for facilitating the regulation of irrigation-water applications.

SCHÄTZUNGSVERSUCHE DER WASSERBEDÜRFNISSE BEI GEMÜSEANBAU UNTER MITTELMEERKLIMA

Im Laufe eines Feldversuches auf einen gewerblichen Tomatenanbau, wurde der Einfluss von 4 Wasserversorgungsniveaus auf Pflanze und Boden studiert. Die angewandten Wassermengen wurden mit Hilfe einer klimatischen Formel bestimmt welche die potentielle Evapotranspiration errechnet, und so vorgesehen, damit der Boden den Pflanzen, eine theoretisch zunehmende Beisteuerung seiner Reserven von 0 bis 4 mm pro Tag liefert. An Hand von Bilanzen von in situ sich befindenden Böden, konnte man sich davon überzeugen dass der wirkliche Bodenbeitrag niedriger liegt als der theoretische Beitrag, was sich durch ein Wasserversorgungsdefizit der Pflanze bemerkbar macht.

Was die Auswirkungen der Bewässerung gegenüber dem Anbau betrifft, so wirkten sich, die im Laufe von zwei besonders kritischen Vegetationsperioden dargebrachten Gaben günstig auf die Faktoren des Endertrages aus : Grösse und Anzahl der Früchte. Wenn die gebotenen Wasservolumen nur 30 p. 100 des maximal zu benützenden Volumens erreichen, so notiert man jedoch einen Ertrag an Früchten welcher annähernd 70 p. 100 des Optimumertrages erreicht.

Andererseits zeigte man, dass in einem gegebenen Moment, eine Beziehung besteht zwischen dem Wassergehalt der Blätter und dem theoretischen Bodenbeitrag ; diese Beziehung ist geeignet die Regulierung des Bewässerungsrythmus zu erleichtern.

Опыты оценки обеспечения влагой овощных культур в условиях Средиземноморского климата.

Ф. ЮГЕ (Агростанция Монфавэ [Воклюз]).

В четырех экспериментальных полевых опытах над культурой помидоров для промышленности было изучено влияние четырех различных уровней водного питания, как на растение, так и на почву. Дозы добавочной воды разсчитанные и примененные на базе климатической формулы потенциального эвотранспирационного расхода влаги, были предвидены с таким разсчетом, чтобы почва сама доставляла растению теоритические прибавки влаги почерпнутые из собственных запасов в раз-

мерах от 0 до 4-х миллиметров в день. Водный балланс почвы показал что ее действительное участие меньше теоритического, результатом чего и явился дефицит в водном питании растений.

Что-же касается внешнего действия орошений на культуру, было отмечено, что ирригационные дозы данные в два критических периода растительного цикла благоприятно отразились на конечной урожайности : величине и количестве плодов. Замечено было, однако, что при орошениях использовавших только 30 % возможного максимального количества воды, урожайность достигала до 70 % оптимума.

Опыты доказали, с другой стороны, что существует прямое соотношение между содержанием воды в листьях данной культуры в данный момент и теоритическим снабжением влагой из почвы; соотношение это способно облегчить регулировку ритма орошений.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 109-119.

LES BESOINS EN EAU RÉELS DES CULTURES ET LES POSSIBILITÉS D'UTILISATION DES RÉSERVES D'EAU DU SOL EN TUNISIE. INFLUENCE DE LA SALURE

J. DAMAGNEZ et O. de VILLÈLE

Les recherches conduites par la Section de Bioclimatologie du Service Botanique et Agronomique de Tunisie sur la détermination des besoins en eau des cultures irriguées à l'eau douce ou à l'eau salée ont pour but d'étudier dans quelle mesure il est possible de réduire les doses d'irrigation et quelle peut être, pour une contribution théorique du sol à l'alimentation hydrique fixée, la contribution réelle.

Les études faites dans 3 périmètres irrigués, répartis suivant un axe Nord-Sud de la Tunisie (Tunis, Sfax, Gabès) montrent une diminution de 10 p. 100 en moyenne de la consommation d'eau maximum dans le cas d'utilisation d'eaux chargées en sels.

Les possibilités d'utilisation des réserves d'eau du sol semblent montrer par ailleurs qu'il soit possible de réduire la dose d'irrigation de 25 p. 100 par rapport à celle qui est calculée pour assurer les besoins en eau maxima de la culture, c'est-à-dire son évapotranspiration potentielle.

THE ACTUAL WATER REQUIREMENTS OF CROPS AND POSSIBILITIES OF THE UTILIZATION OF WATER RESERVES IN TUNISIA. EFFECT OF THE SALT CONTENT

Investigations, conducted at the Section of Bioclimatology of the Botanical and Agricultural Service of Tunisia, for determining the water requirements of crops irrigated with normal and saline waters, proposed to establish the possibilities of reducing the rate of irrigation and to study the real contribution of water by the soil as compared with the theoretical contribution at a fixed water supply.

The investigations, carried out in three irrigated perimeters over the north-south axis of Tunisia (Tunis, Sfax, Gabès), showed an average decrease of 10 p. 100 in the maximum utilization of saline waters.

The possibilities of utilizing the water reserves of the soil suggest that a rate of irrigation reduced by 25 p. 100 in relation to the calculated amounts would satisfy the maximum water requirement, that is the potential evapotranspiration, of crops.

DIE WIRKLICHEN WASSERBEDÜRFNISSE DER KULTUREN UND DIE MÖGLICHKEITEN EINER BENÜTZUNG DER BODENWASSERRESERVEN IN TUNESIEN. EINFLUSS DES SALZGEHALTES

Die durch die Section de Bioclimatologie des Services Botanique et Agronomique von Tunesien durchgeführten Studien bezüglich der Bestimmung der Wasserbedürfnisse von, mit Süss-oder Salzwasser bewässerten Kulturen, verfolgen das Ziel, den Masstab einer Verminderungsmöglichkeit

der Bewässerungsgaben festzulegen, sowie den wirklichen Beitrag festzustellen, welcher bei einer gegebenen Wasserversorgung besteht, in Bezugnahme auf die theoretische Bodenbeisteuerung.

Die Studien wurden in drei bewässerten Gebieten Tunesiens, längs einer Nord-Südachse (Tunis, Sfax, Gabès) durchgeführt ; sie zeigten eine, im Mittel, zehnprozentige Verminderung des maximalen Wasserverbrauchs, im Falle einer Benützung von salzhaltigem Wasser.

Die Verwendungsmöglichkeiten der Bodenwasserreserven scheinen anzudeuten, dass es möglich ist, die Bewässerungsgaben, welche in Bezug auf diejenigen errechnet wurden, die die maximalen Wasserbedürfnisse der Kultur, d.h. ihre potentielle Evapotranspiration sicher stellen, um 25 p. 100 vermindert werden können.

Реальные водные нужды культур и возможность использования почвенных запасов влаги в Тунисе Влияние засоления.

Ж. ДАМАНИЕЗ (Биоклиматическая Секция Ботанического и Агрономического Центра — Тунис).

Целью исследований проведенных Отделом Биоклиматологии Ботанического и Агрономического Центра в Тунисе над орошением пресной или соленой водой явилось изучение возможностей сокращения ирригационных доз и точное определение величины действительного водоснабжения растений почвой в добавление к установленному питанию, по сравнению с водоснабжением теоритическим.

Исследования проведенные на трех орошенных участках расположенных по оси Север-Юг Туниса (Тунис, Сфакс, Габес) показали что в случаях ирригации при помощи засоленых вод, максимальное потребление влаги уменьшалось в среднем на 10 %.

С другой стороны возможно что использование водных запасов почвы может привести к сокращению ирригационных доз на 25 % по отношению к дозам разсчитанным для удовлетворения максимальных потребностей культуры, или, иначе говоря, ее потенциального эвотранспирационного расхода влаги.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 121-126.

PREMIERS RÉSULTATS DE L'ÉVOLUTION DE LA SALURE DU SOL PAR IRRIGATION A L'EAU SALÉE EN TUNISIE

J. P. Cointepas et P. Roederer

La Section de Pédologie et le Centre de Bioclimatologie de Tunisie ont entrepris en 1960 une étude conjointe sur les besoins en eau des plantes en secteur irrigué à l'eau salée (2,7 à 2,9 g/l de résidu sec). Appliquant des doses différentielles correspondant à l'évapotranspiration potentielle (E. T. P.) à l'E. T. P. - 1mm/jour, E. T. P. - 2 mm/jour, E. T. P. - 4 mm/jour les auteurs ont constaté qu'en sol sablo-limoneux gypseux, salé, les doses d'irrigation étaient suffisantes pour permettre des cultures de maïs et de coton. La dose d'eau la plus faible provoque une légère remontée de la salure.

En sol limono-argileux non salé, la salure du sol parait d'autant moins forte que la dose d'irrigation est plus faible. Etant donné que les rendements ne diminuent sensiblement que pour des doses inférieures à E. T. P. - 2 mm/jour, il est donc recommandé de limiter l'irrigation aux doses d'appoint correspondant au rendement économique optimum et de laisser la pluie effectuer le lessivage des sels solubles. Lorsque celle-ci est insuffisante on réservera les irrigations de lessivage à la période hivernale où l'évaporation et donc le danger de remontée du sel sont les plus faibles.

L'expérience se poursuit sur les mêmes parcelles afin de suivre l'évolution de la salure sur plusieurs années.

FIRST RESULTS ON THE EVOLUTION OF SOIL SALINITY UNDER IRRIGATION WITH SALINE WATERS IN TUNISIA

The Pedological Section and the Centre of Bioclimatology of Tunisia conducted in 1960 investigations on the water requirements of plants in a sector irrigated with saline waters (2,7 - 2,9 g/l dry residue). By applying water at differential rates corresponding to potential evapotranspirations (ETP) of 1 - 4 mm/day, it was found that these rates were sufficient for the cultivation of maize and cotton on saline, gypseous sandy loams ; the lowest rate caused a slight increase in salinity.

In non-saline clay-loams, salinity was least marked under irrigation at low rate. Since yields do not decrease considerably but at rates of ETP lower than 2 mm/day, it is recommended to limit irrigation rates to the economically optimum yield and to permit the rains to leach the soluble salts. Should this be insufficient, irrigation applied for leaching ought to be done during the winter when evaporation and the consequent danger of rising salt are at their minimum.

The experiments are being continued on the same plots with a view to following the evolution of salinity through several years.

ERSTE RESULTATE ÜBER DIE ENTWICKLUNG DER BODENSALZHALTIGKEIT IN TUNISIEN, BEI BEWÄSSERUNG MIT SALZWASSER

Die Section de Pédologie und der Centre de Bioclimatologie von Tunesien unternahmen 1960 eine gemeinsame Studie bezüglich der Wasserbedürfnisse der Pflanzen in, mit Salzwasser (2,7 bis 2,9 g/L Trockenrückstand), bewässerten Sektoren.

Bei Verwendung differentieller Gaben welche einer potentiellen Evapotranspiration (ETP) von ETP - 1 mm/Tag, ETP, - 2 mm/Tag und ETP - 4 mm/Tag entsprechen, stellten die Autoren fest, dass für ein sandig-lehmiger, gips-und salzhaltiger Boden, die Bewässerungsgaben ausreichend waren um einen Anbau von Maïs und Baumwolle zu gestatten. Die schwächste Wassergabe hatte einen leichten Anstieg der Salzigkeit zur Folge.

In lehmig-tonigem, nicht salzhaltigem Boden, scheint die Salzigkeit umso schwächer zu sein, je geringer die Bewässerungsgabe war. Indem ein bemerkbares Absinken der Erträge nur bei Gaben die niedriger als ETP 2 mm/Tag lagen eintraten, so scheint es angebracht die jeweiligen Ergänzungsgaben, auf die, dem optimalen wirtschaftlichen Ertrag entsprechenden zu beschränken und es den Niederschlägen zu überlassen, die löslichen Salze auszuwaschen. Wenn letztere als ungenügend erscheinen, so betreibe man die Auswaschungsbewässerung während der winterlichen Periode, in der die Evaporation und die Gefahr eines Salzanstieges am geringsten sind.

Der Versuch wird auf den selben Parzellen fortgeführt um die Entwicklung der Salzhaltigkeit im Verlaufe mehrerer Jahre zu verfolgen.

Первые данные об эволюции засоления почв орошением соленой водой в Тунисе.

Ж. П. КУАНТЕПА и П. РЁДЕРЕР (Педологический Отдел — Тунис).

Педологический Отдел и Биоклиматологический Центр в Тунисе предприняли в 1960-м году совместное изучение водоснабжения растений в секторе получившем поливы соленой водой (2,7 - 2,9 гр/л сухого осадка). Авторы констатировали что в почвах песчано-суглинистых гипсовых или солончаковых, принесение дифференциальных доз влаги соответствующих ее потенциальному эвотранспирационному расходу (ЕТР) равному 1-му, 2-м и 4-м миллиметрам в сутки, оказалось достаточным для культур кукурузы и хлопка. Наиболее слабая доза воды — вызвала легкое повышение засоления.

Напротив, — в не солончаковых песчано-суглинистых почвах, ослабление засоления было пропорционально повышению ирригационных доз.

В виду чувствительного уменьшения урожайности при применении ирригационных доз не достигавших 2-х миллиметров в сутки, рекомендуется ограничить поливы применением только воспомогательных доз, соответствующих максимальной экономической доходности, предоставив дождевым осадкам вымывание растворимых солей.

В случаях недостатка дождевых осадков, советуется отсрочить промывные орошения до зимнего периода, когда испарение а следовательно и опасность под'ема соли — наиболее слабы.

Опыты продолжаются на тех-же делянках чтобы проследить эволюцию засоления за несколько лет.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 127-134.

L'APPROVISIONNEMENT EN EAU DU SOL, LES FACTEURS CLIMATIQUES ET LA VÉGÉTATION DU MAÏS DANS LE LANGUEDOC MÉDITERRANÉEN

M. Godard

Les essais ont porté sur maïs, cultivé en cases lysimétriques de 2 m. de profondeur, en sol d'alluvions. Le sol fut complètement resaturé sur toute son épaisseur par une irrigation à fin juin, trois semaines avant la floraison femelle alors que les plantes atteignaient 50 cm de haut. Sur une série de cases, aucune irrigation ultérieure ne fut ensuite donnée : l'alimentation hydrique s'effectua donc aux seuls dépens du stock ainsi accumulé et des pluies tombées. Cette série sera dénommée ici « culture sèche ». Une autre série de cases fut irriguée suivant l'évapotranspiration potentielle et servit de témoin.

Pendant la période de juillet et d'août, la culture sèche a consommé 360 mm. d'eau environ. Sur ce total, les deux tiers ont été fournis par les réserves accumulées dans le sol. L'assèchement progressif du sol qui en est résulté s'est traduit par un déficit hydrique important ayant atteint un maximum de 260 mm. et la plante a été contrainte de s'alimenter dans des couches du sol de plus en plus profondes. Cependant, elle n'a pas manifesté de symptômes dépressifs visibles, sauf un léger flétrissement des sommets pendant la floraison femelle, tout à fait à la fin d'une série de journées particulièrement sévères. Ces symptômes entraînèrent une nette réduction du nombre de grains récoltés par plante.

La consommation en eau et les rendements de la culture témoin ont été les plus élevés, ce qui souligne la nécessité d'apports d'eau réguliers pour le maximum de production. Cependant le rendement en grains de la culture sèche a été inférieur de 12 p. 100 seulement par rapport au témoin.

Ces résultats soulignent l'aptitude de la plante à s'alimenter dans les couches profondes du sol. En raison de la sécheresse de l'été méditerranéen, il peut donc être profitable de réhumecter complètement le sol à une date relativement précoce afin de constituer un stock de sécurité. La demande d'eau par les utilisateurs n'est alors pas encore très grande et l'exploitation d'un réseau d'irrigation peut en être en outre facilitée. Ultérieurement, l'eau disponible sera consacrée de préférence, avec le maximum d'efficacité, aux plantes près d'atteindre la floraison.

THE WATER SUPPLY TO SOIL, CLIMATIC FACTORS AND THE GROWTH OF MAIZE IN THE MEDITERRANEAN LANGUEDOC

The experiments were conducted with maize grown on 2-m deep lysimeters filled with alluvial soil. The soil was completely resaturated throughout its profile by irrigation at the end of June, three weeks before the female flowering when plants were 50 cm high. Some lysimeters did not receive any further irrigation so that water uptake occurred only from the accumulated reserves and additional rains ; this series was called « dry culture ». Other lysimeters were irrigated according to potential evapotranspiration and served as controls.

During July and August, the dry culture consumed about 360 mm water ; of this amount, two thirds were supplied from the reserves accumulated in the soil. The consequent progressive drying of the soil led to a considerable water deficiency, attaining a maximum of 260 mm and forcing the plant to take up water from ever increasing depths. Nevertheles, there were no visible symptoms except for a slight wilting at the top during female flowering, at the very end of a series of particularly severe days ; this resulted in a decrease in the number of grains per plant.

Water consumption and yields of the controls were the highest, stressing the need for a regular water supply in maximum production ; however, the grain yield of dry cultures was only 12 p.100 lower than that of the controls.

Results show the great ability of plants to take up water from the deep layers of soil. Due to dry summers in the Mediterranean region, it appears profitable to remoisten the soil completely at a relatively early date so as to form a safety reserve. The demand for water by users is not very high yet, and the utilization of an irrigation network could be promoted. Ultimately, the available water will have to be used with maximum efficiency preferably for plants near the stage of flowering.

DIE WASSERVERSORGUNG DES BODENS, DIE KLIMATISCHEN FAKTOREN UND DIE VEGETATION DES MAIS IM MEDITERRANEN LANGUEDOC

Die Versuche wurden mit Mais, in zwei Meter tiefen Lysimetern auf einem Alluvialboden durchgeführt. Der Boden wurde auf seiner ganzer Tiefe vollständig gesättigt mittels einer, Ende Juni, durchgeführten Bewässerung und dies, drei Wochen vor dem weiblichen Blütenstand, als die Pflanzen eine Höhe von 50 cm aufwiesen. Auf eine der Lysimeterserie wurde keine zusätzliche Bewässerung ausgeführt : die Wasserversorgung beruhte daher einzig und allein auf dem so hergestellten Wasserbestand sowie die gefallenen Niederschläge Diese Série wurde hier « Trockenkul tur » genannt. Eine andere Lysimeterserie wurde nach der potentiellen Evapotranspiration bewässert und diente zur Kontrolle.

Während des Zeitabschnittes Juli-August, verbrauchte die Trockenkultur ungefähr 360 mm Wasser. Auf diese Gesamtsumme, wurden zwei Drittel durch die im Boden vorhandenen Reserven geliefert. Die fortschreitende Austrocknung des Bodens welche sich hieraus ergab, äusserte siche durch einen ansehlichen Wasserdefizit, der ein Maximum von 260 mm erreichte und die Pflanze war genötigt, sich in immer tiefer liegenden Bodenschichten zu versorgen. Jedoch zeigten sich keine sichtbare depressive Anzeichen, ausser einer kleinen Spitzenwelke, welche sich im Laufe des weiblichen Blütenstandes und gegen Ende besonders strenger Tage bemerkbar machte. Diese Anzeichen bewirkten eine unumwundene Verminderung der pro Pflanze geernteten Körnerzahl.

Der Wasserverbrauch und die Erträge der Kontrollkultur lagen am höchsten, Tatsache, welche die Notwendigkeit von regelmässigen Wassergaben hervorhebt um zu einer maximalen Produktion zu gelangen. Jedoch lag der Körnerertrag der Trockenkultur nur um 12 p. 100 niedriger als derjenige der Kontrollkultur.

Diese Ergebnisse unterstreichen die Fähigkeit der Pflanze sich in tieferen Schichten zu versorgen. Infolge der Trockenheit der mediterranen Sommer, erscheint es als vorteilhaft an einem verhältnismässig frühen Datum, den Boden vollständig anzufeuchten um Sicherheitsreserven zu bilden. Eine Wassernachfrage durch die Verbraucher liegt um diesen Zeitpunkt nicht sehr hoch, und der Betrieb des Bewässerungsnetzes kann hierdurch erleichtert werden. Später, kann das verfügbare Wasser vorzugsweise dazu benützt werden, um mit maximaler Wirksamkeit, den Pflanzen zu erlauben, die Blüteperiode ohne Schaden zu erreichen.

Снабжение почвы водой. Влияние климатологических факторов на произростание кукурузы в Средиземноморском Лангедоке.

М. ГОДАР (Биоклиматологический Отдел — Монпелье).

Опыты производились над кукурузой произроставшей в лизиметрических делянках лёсовой почвы глубиной в 2 метра. Весь слой лёсовой почвы пропитывался водой при помощи орошения производившегося в конце Июня, за три недели до женского зацветания, когда растения достигали 50 см высоты. Одна серия делянок не получила вне этого

никаких добавочных поливов и последующее ее питание было обусловлено за счет водного запаса почвы и дождевых осадков. Эта серия будет называться « культурой сухой ». Вторая серия делянок получила дополнительные поливы пропорциональные эвотранспирационному расходу влаги и послужила контрольным вариантом.

За Июль и Август « культура сухая » потребила приблизительно 360 мм влаги. Две трети этого общего количества были ей доставлены запасами почвенной влаги. Но постепенное осушение почвы вызвало серьезный водный дефицит достигший максимума в 260 мм и растения были принуждены добывать влагу из слоев почвы все более и более глубоких. Растения однако не проявили видимых симптомов депрессии если не считать легкого увядания верхов в период женского цветения, и то только к концу дней исключительно жарких. Эти симптомы вызвали все-же сильное сокращение количества зерен собранных с каждого растения.

Потребление влаги и урожайность оказались гораздо более крупными на контрольных вариантах — что доказывает необходимость регулярных ирригаций для получения максимальной продукции. Урожай же зерен с « культуры сухой » оказался только на 12 % меньше зернового урожая контрольного варианта.

Эти результаты доказывают способность растения извлекать влагу из самых глубоких слоев почвы. В виду засушливости Средиземноморского лета советуется поэтому увлажнять как следует почву в сравнительно ранний период года дабы создать вспомогательный запас влаги. Создание запаса влаги в этот период года облегчается тем что в это время спрос потребителя на воду еще не очень велик и правильная эксплуатация ирригационной сети может быть этим толко облегчена, ибо таким образом позже вся свободная влага сможет быть направлена предпочтительно и с разсчетом на максимальную эффективность, на орошение растений находящихся накануне периода зацветания.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 136-144.

COMPTE RENDU DES ESSAIS D'IRRIGATION FAITS A L'ÉCOLE DE VALABRE EN 1959 ET 1960

J. GRANIER

Dans le cadre de nouveaux réseaux d'irrigation distribuant l'eau *à la demande, sous pression*, les essais poursuivis ont pour but d'établir, pour une culture donnée et dans un cas particulier, la relation : rendement — humidité du sol.

L'humidité du sol est maintenue à un niveau de référence (25 cm) entre deux valeurs limites arbitrairement choisies.

Les essais poursuivis pendant un ou deux ans, comportent de 3 à 5 traitements différents avec répétition sur luzerne, pomme de terre et artichauts.

Ils ont permis de mettre en valeur :

— les consommations d'eau dans les différents cas (sans distinguer les évaporations, les transpirations ni les percolations éventuelles).

— la productivité du m^3 d'eau consommée (rendement technique).

— les valeurs maxima au delà desquelles le rendement ne croît plus (cas des pommes de terre)

— une influence des arrosages sur la précocité (cas des artichauts).

A REPORT ON IRRIGATION TRIALS CONDUCTED AT THE SCHOOL OF VALABRE IN 1959-1960

Within a new irrigation system, where water is distributed on demand under pressure, experiments had been conducted to establish the relationships between yield and soil moisture for a given crop and in a particular case.

Soil moisture was maintained at a level of reference (25 cm) between two arbitrarily chosen values.

The two-year experiments involved 3 to 5 different replicated treatments to lucerne, potato and artichoke.

Determinations were made of :

The water consumption in the different cases (without distinguishing between evaporation, transpiration and possible percolation) ;

the productivity of each cubic metre water consumed (technical yield) ;

the maximum values above which there is no yield increase (potato) ;

the effect of irrigation on early maturing (artichoke).

BERICHT ÜBER BEWASSERUNGS VERSUCHE WELCHE 1959 UND 1960 IN DER ECOLE VON VALABRE DURCHGEFÜRHT WURDEN

Im Rahmen des neuen Bewässerungsnetzes, welches Wasser nach Anfrage und unter Druck liefert, verfolgen die durchgeführten Versuche, das Ziel, die Beziehung Ertrag-Bodenfeuchtigkeit, für eine gegebene Kultur und in einem speziellen Falle, festzulegen.

Die Bodenfeuchtigkeit wurde auf einem Bezugsnahmeniveau erhalten (25 cm) und zwar zwischen zwei Grenzwerten welche willkürlich gewählt wurden.

Die während ein oder zwei Jahren verfolgten Versuche auf Luzerne, Kartoffeln und Artischocken, umfassen drei bis fünf verschiedene Versuchsanordnungen, welche Wiederholungen betragen.

Sie erlaubten folgendes hervorzuheben :

— den Wasserverbrauch in den verschiedenen Fällen (ohne Unterscheidung der eventuellen Evaporationen, Transpirationen und Einsickerungen).

— die Produktivität pro verbrauchtem m³ (technischer Ertrag)

— die maximalen Werte über welchen der Ertrag nicht mehr ansteigt (Fall bei Kartoffeln)

— ein Einfluss der Bewässerung auf die Frühreife (Fall bei Artischocken).

Отчет об опытах орошения проведенных сельско-хозяйственной школой в Валабре в 1959-1960 г. г.

ГРАНИЕ (Сельско-хозяйственная школа-Валабр).

Опыты проведенные при помощи новой ирригационной сети распределявшей воду по необходимости и под нужным давлением имели целью установить соотношение между урожайностью данной культуры и влажностью почвы в каждом частном случае.

Влажность почвы поддерживалась на определенной глубине (25 см) на условно заданном уровне между двумя арбитрарно выбранными пределами.

Испытания длившиеся 1 и 2 года состояли в 3-5-ти повторных поливах культур люцерны, картофеля и артишоков. Эти опыты позволили определить :

— Общее потребление воды в различных случаях (без различения испарений, транспирации или глубокой фильтрации).

— Продуктивность кубометра потребленной воды (технический доход).

— Максимальные пределы урожайности, выше которых она не идет (картофель).

— Влияние орошений на скороспелость артишоков.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 145-155.

PROBLÈMES POSÉS PAR LE DRAINAGE ET L'IRRIGATION DES SOLS DE BRENNE

Simone PÉRIGAUD

Erratum

p. 154, 2e partie du tableau, lire :

	Humidité à		
	pF 2,7	3,0	4,2
Sol de limon			
0 — 20	21	18	7
20 — 35	18	15	8
35 — 60	31	28	**17**

L'étude de la réhumectation et de la dessication de deux types caractéristiques de sols de Brenne a mis en évidence le mode particulier de circulation de l'eau dans les profils hydromorphes, à horizon nettement différenciés, dépourvus d'une structure nette et très instable à l'eau.

Il ressort de cette étude les points suivants :

1° L'efficacité limitée d'un assainissement par drains en poterie dans l'état actuel de ces sols ;

2° la nécessité, si l'on veut rendre ces sols normalement utilisables, de leur créer une structure puis de maintenir celle-ci ;

3° la difficulté pour concilier, dans ces sols à la fois secs et imperméables, l'obligation d'une amélioration de leur structure en profondeur et l'utilité d'irrigations par aspersion ;

4° sur le plan plus général :

— la signification limitée dans ces cas des mesures classiques d'humidité équivalente servant à définir les réserves en eau disponibles d'un sol ;

— le caractère essentiellement évolutif dans le temps de cette notion de « réserves hydriques » ;

— la bonne corrélation existant entre les tests HENIN et les cas de mauvaise perméabilité par défaut de structure.

THE PROBLEMS OF DRAINAGE AND IRRIGATION OF SOILS IN BRENNE

Studies involving the wetting and drying of two characteristic soil types in Brenne showed the special way of water circulation in hydromorphic soils of clearly differentiated horizons, without any marked structure and highly unstable towards water.

Results indicated :

1° The limited efficiency of tile drainage in the present state of the soils ;

2° The need for establishing and maintaining a structure for a normal utilization of these soils ;

3° The difficulty in reconciling the need for structural improvement with the usefulness of overhead irrigation on these soils, both dry and impermeable ;

4° The limited importance of the classical determination of equivalent moisture for defining the available water reserves in these soils ;

5° The essentially evolutional character with time of the concept of water reserves ; and

6° The good correlation between the HENIN tests and poor permeability associated with a bad structure.

ZUR DRAINAGE UND BEWÄSSERUNG DER BÖDEN DER BRENNE GESTELLTE PROBLEME

Das Studium der Wiederbefeuchtung und der Austrocknung zweier karakteristischen Bodentypen der Brenne hat die besondere Art der Wasserbewegung hydromorpher Profile mit differenzierten Horizonten, welche keine scharfe Struktur besitzen und sich sehr unbeständig gegenüber Wasser zeigen, hervorgehoben.

Aus dieser Studie ergeben sich folgende Punkte :

1° Im gegenwärtigen Zustand dieser Böden, begrenzte Wirksamkeit bei Sanierung durch Dränröhren aus Steingut.

2° Wenn man diese Böden einer normalen Nützung zuführen will, die Notwendigkeit ihnen eine Struktur zu verleihen und dieselbe beizubehalten ;

3° In diesen gleichzeitig trockenen und undurchlässigen Böden, die Schwierigkeit, eine Uebereinstimmung zwischen der Notwendigkeit einer Strukturverbesserung in der Tiefe und der Nützlichkeit einer Bewässerung durch Berieseling herzustellen ;

4° Auf einer allgemeineren Ebene :

— die begrenzte Bedeutung in dem Falle einer klassischen Bestimmung der minimalen Wasserkapazität welche dazu dient, die zur Verfügung stehenden Bodenwasserreserven zu bestimmen.

— der hauptsächlichst zeitliche Entwicklungscharakter des Grundbegriffes der « Wasserreserven » ;

— die gute Wechselbeziehung welche zwischen den Proben nach Henin und all den Fällen einer schlechten Durchlässigkeit infolge von Strukturlosigkeit besteht.

Задачи поставленные дренажем и орошением почв района Бренн.

С. ПЕРИГО (Агростанция в Шатору).

Изучение увлажнения и высушивания двух характерных образцов почв Бреннской области выявило особенности передвижений влаги в не водопрочных гидроморфических профилях с дифференцьированными горизонтами и не имеющих выявленой структуры.

Оно привело к следующим выводам :

1. Эффективность мелиорации гончарным дренажем весьма ограничена в настоящем состоянии этих почв.

2. Необходимо упрочнить и поддерживать структуру этих почв в целях их нормального употребления.

3. Для почв сухих и в то-же время непроницаемых существует трудность согласования необходимости улучшения структуры подпочвы с пользой поверхностных орошений.

4. В плане общем :

— Значение классических измерений эквивалентной влажности для определения водных запасов этих почв — ограничено.

— Характер понятия « водный запас » исключительно изменчив во времени.

— Существует хорошая корреляция между результатами проб водопрочности по Энэну и слабой водопроницаемостью этих почв вызванной деффектами их структуры.

Ann. agron., 1961, **12** (1), 157-168.

DYNAMIQUE RADICULAIRE ET ALIMENTATION EN EAU DES VÉGÉTAUX

A. Vernet et R. Chaussat

En période sèche l'alimentation en eau des végétaux est conditionnée par l'humidité du volume de terre occupé par les racines, mais aussi par la progression du front radiculaire. Celle-ci fournit à la plante une quantité d'eau fonction de la surface du front radiculaire et de la vitesse de croissance des racines. Dans les plantations à grand écartement la surface du front radiculaire est de forme sphérique et sa progression peut fournir au végétal des quantités d'eau suffisantes pour subvenir à ses besoins dans la plupart des cas. Dans les plantations serrées, la surface du front radiculaire est plane et réduite. La vitesse de croissance des racines dépend d'un certain nombre de facteurs dont

l'humidité et l'aération du sol, ceci permet d'expliquer quelques observations écologiques, en particulier l'action des labours profonds.

Des résultats partiels sont fournis sur l'absorption de l'eau par préférence au voisinage de la surface dans un sol de luzernière et sur la vitesse de croissance de la racine primaire de plantules de blé.

THE DYNAMICS OF ROOTS AND MOISTURE SUPPLY TO PLANTS

During a dry period, the water uptake by plants is governed by the moisture content of the volume of soil containing the roots, and also by the progress of root penetration. This supplies water to the plants according to the surface of the root front and the rate of root growth. In crops of low density, the surface of the root front assumes a spherical form and may supply water in generally sufficient amounts. In dense cultures, the surface of the root front is plane and reduced. The rate of root growth depends on various factors, including the moisture content and aeration of the soil; this explains certain ecological observations especially in respect of the effects of deep plowing.

Some results are given on the preferential absorpstion of water from the near-surface layers under a lucerne culture, and on the rate of growth of primary roots in wheat seedlings.

WURZELDYNAMIK UND WASSERSPEISUNG DER PFLANZEN

In trockenen Perioden ist die Wasserversorgung der Pflanzen durch die Feuchtigkeit des durch die Wurzeln durchsetzten Bodenvolumen bedingt, aber auch durch das fortschreitende Eindringen der Wurzelfront. Diese liefert den Pflanzen eine Wassermenge welche Funktion der Wurzelfront und der Wurzelwachstumsgeschwindigkeit ist. In Anpflanzungen welche eine grosse Pflanzenweite aufweisen ist die Wurzelfrontfläche sphärisch und ihr Tiefeeindringen liefert der Pflanze eine genügende Wassermenge, welche in vielen Fällen ihre Bedürfnisse deckt. In Anpflanzungen mit geringer Pflanzenweite ist die Wurzelfront flachförmig und stark vermindert. Die Wachstumsgeschwindigkeit der Wurzeln ist von einer gewissen Anzahl von Faktoren abhängig, wovon die Feuchtigkeit und Bodendurchlüftung; dies erlaubt es, einige ökologische Beobachtungen zu erklären, insbesondere die Auswirkung des Tiefpflügens.

Teilresultate ergeben sich durch die Vorliebe einer Wasseraufnahme in Bodenoberflächennähe in einem mit Luzerne angebautem Boden, sowie über die Wachstumsgeschwindigkeit der primären Wurzel von Weizenkeimlingen.

Динамика корневой системы и водное питание растений.

А. ВЕРНЭ и Р. ШОССА (Научная Лаборатория при Кафедре Экологии и Физиологии Растений — Национальный Агрономический Институт).

Водное питание растений в сухие периоды обусловлено не только влажностью об'ема почвы занятого корнями, но и проникновением корневой системы вглубь. Почва доставляет растению количество влаги пропорциональное площади корневой системы и скорости пpoрастания корней. В плантациях с крупными интервалами, площадь занятая корневой сетью имеет сферическую форму и продвижение ее вглубь доставляет растению количество влаги в большинстве случаев достаточное для покрытия его нужд. В насаждениях тесных площадь «корешкового фронта» невелика и плоска. Быстрота роста корней зависит от небольшого количества факторов, как например процент влажности почвы и ее аэрация. Этим об'ясняются некоторые экологические наблюдения и в особенности благоприятное влияние глубоких вспашек.

Даются частичные результаты опытов над потреблением воды главным образом у поверхности почвы под люцерной и над скоростью пpoрастания первичного корешка пшеничного проростка.

Ann. agron., 1961, **12** (3), 273-331

551. 321. 1 : 551. 311. 22.

MISE AU POINT SUR LES PROCESSUS DE L'ALTÉRATION DES GRANITES EN PAYS TEMPÉRÉ

D. COLLIER
Station d'Agronomie, Centre de Recherches agronomiques du Massif Central, Clermont-Ferrand.

PLAN DU MÉMOIRE

INTRODUCTION.

A. — OBSERVATIONS.

1. — L'arénisation.
 - *a*) Aspect des arènes.
 - *b*) Constitution granulométrique.
 - *c*) Observations minéralogiques.
 - — Étude minéralogique comparée des roches saines et altérées.
 - — Étude minéralogique des fractions granulométriques.
 - *d*) Composition chimique.
 - — Comparaison des fractions granulométriques entre elles.
 - — Composition de minéraux isolés.
 - — Composition des dépôts d'altération.
 - *e*) Tentative d'évaluation de l'intensité de l'altération chimique.
2. — Granites non arénisés.
 - *a*) Aspect de la roche altérée et constitution granulométrique.
 - *b*) Observations minéralogiques.
 - *c*) Composition chimique.
3. — Sols granitiques.
 - *a*) Aspect des profils.
 - *b*) Constitution physique.
 - *c*) Constitution minéralogique.
 - *d*) Composition chimique.
 - *e*) Degré et bilan d'altération chimique.
4. — Altération des granites dans d'autres régions climatiques.
 - I. — Régions arctiques et de hautes montagnes.
 - II. — Régions désertiques et subtropicales.
 - III. — Régions tropicales.
 - *a*) Aspect des profils.
 - *b*) Constitution granulométrique.
 - *c*) Examens minéralogiques.
 - *d*) Composition chimique.
 - *e*) Degré d'altération chimique.
5. — Composition chimique élémentaire des eaux de terrains cristallins.

B. — Expériences.

1. — Altération chimique des minéraux et des roches silicatées.
2. — Synthèse et transformation des argiles.
3. — Désagrégation des roches granitiques.

C. — Interprétation.

1. — Altération chimique des minéraux du granite.
2. — Désagrégation du granite, formation de l'arène.
3. — Altération biologique, formation du sol.
4. — Caractéristiques des altérations des granites dans d'autres régions climatiques et altération différentielle.

D. — Applications agronomiques.

— Fertilité chimique naturelle des sols.
— Emploi comme engrais de minéraux de roches broyées.

Conclusions.

Résumé.

Références bibliographiques.

INTRODUCTION

Le granite est la roche dont l'altération a été certainement la plus étudiée ; il est vrai qu'il est de loin la roche éruptive la plus répandue. Cela tient peut-être aussi au mode d'altération particulier et spectaculaire que subissent la plupart des granites : *l'arénisation*, c'est à-dire la désagrégation massive de la roche en ses minéraux. On peut penser que la *kaolinisation* des feldspaths, qu'on a cru pendant longtemps être la cause essentielle de cette arénisation, a pu contribuer également à stimuler cette étude.

L'importance qu'on a accordée autrefois à ce phénomène s'explique par l'utilisation du kaolin pour la fabrication de la porcelaine. Les chimistes ont voulu généraliser à l'altération météorique des granites, les hypothèses qu'ils proposaient pour la formation des gîtes de kaolin.

Les études d'altération furent reprises par les pétrographes qui ont mis longtemps à distinguer les phénomènes superficiels dus aux a*ctions météoriques*, des phénomènes profonds dus aux actions *hydrothermales et pneumatolitiques*, ce qui ne pouvait que renforcer la confusion concernant le phénomène de kaolinisation.

Vinrent ensuite les pédologues qui ne se préoccupèrent pas à l'origine de l'altération, mais du *dynamisme* des éléments dans des matériaux déjà altérés. Le terme de sol donne lieu à une autre confusion : pour le géologue, le sol est la zone superficielle d'altération des roches, tandis que pour le pédologue il n'est que la partie intéressée par la pédogénèse. En pays tempérés, les deux sols peuvent coïncider approximativement pour de nombreuses roches mères, mais précisément pour les granites le profil pédologique n'intéresse que la partie superficielle du profil d'altération qui peut être très profond.

Une première partie traite des *faits d'observation* prolongés par diverses investigations de laboratoire. Il a été largement puisé dans notre propre documentation qui n'a pas été publiée dans son ensemble, elle se rapporte surtout au Massif Central français. L'arénisation a été étudiée sur des granites calco-alcalins à biotite qui sont les plus répandus.

Pour essayer de mettre en évidence certaines causes de l'arénisation, le mode d'altération de granites non massivement désagrégeables a été présenté. Il n'a été question du sol que sous l'angle de la poursuite de l'altération des matériaux granitiques, mais non de son évolution pédologique. Enfin les modes d'altération des granites dans d'autres régions climatiques ont été brièvement décrits.

L'observation d'un phénomène naturel n'est pas toujours suffisante pour expliquer son mécanisme, d'autant plus qu'on ignore souvent les conditions dans lesquelles s'est produit ce phénomène. *La méthode expérimentale* est donc nécessaire, mais il convient de confronter ses résultats avec ceux de l'observation.

Ainsi la durée d'action d'un facteur n'est pas forcément compensée par son intensification. Par exemple, la synthèse de la kaolinite aux hautes températures a une limite minimum très supérieure aux plus fortes températures terrestres, impliquant que les conditions de formation des gîtes de kaolins doivent être différentes de celle de la kaolinite dans les arènes. Cependant, comme l'ont écrit S. HENIN et O. ROBICHET (1953), le temps n'est qu'un facteur d'accumulation et non de formation et l'étude expérimentale de l'altération n'est limitée que par la sensibilité des méthodes employées pour déceler cette altération.

Une seconde partie est donc consacrée aux essais expérimentaux concernant la décomposition chimique des minéraux, la synthèse des produits d'altération et la désagrégation des roches.

Une troisième partie traite de l'historique des *interprétations* relatives à l'altération des minéraux, aux conditions de l'arénisation, au rôle des facteurs biologiques, puis on a essayé de dégager les caractéristiques de l'altération des granites en régions tempérées.

Enfin quelques *conséquences agronomiques* ont fait l'objet d'une quatrième partie.

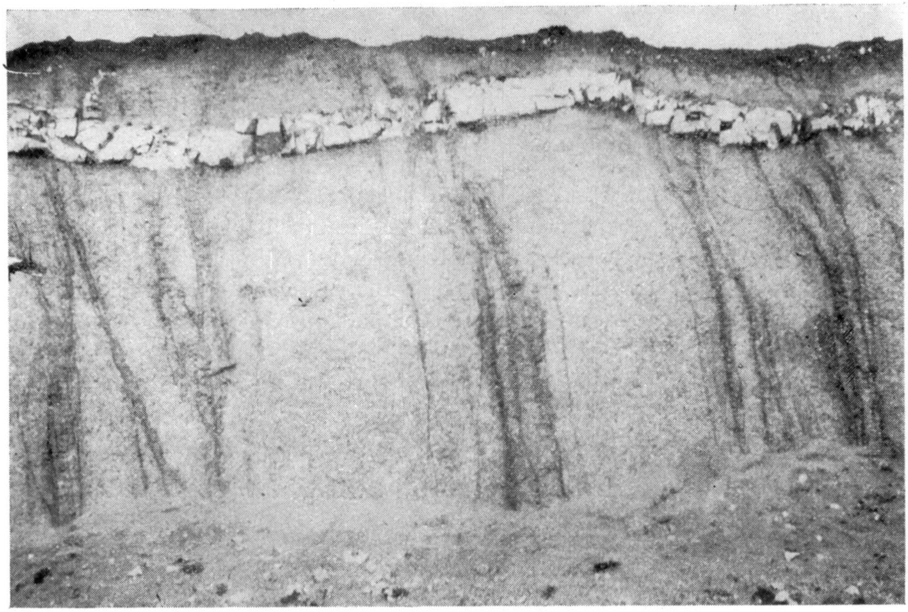
A. — OBSERVATIONS.

I. — L'ARÉNISATION.

Sous l'influence des actions météoriques de nombreuses roches granitiques subissent une altération particulière conduisant à leur désagrégation massive en un produit meuble : *l'arène ou gore*. La profondeur de la zone d'altération est difficilement observable, l'exploitation du sable dans les carrières n'intérassant que la partie la plus meuble. Elle dépend de la situation topographique ; elle est donc extrêmement variable : nulle sur les pentes fortes sans végétation, elle peut atteindre par endroit 10 m et plus sur les croupes et plateaux. Cependant R. CARBIENER (1957) remarque que le manteau d'arène sur la crête des Vosges ne dépasse pas 2 m d'épaisseur. Il n'y aurait pas d'arénisation sous les vallées d'après P. DUFFAUT (1957).

a) *Aspect des arènes.*

Lorsque l'on compare un granite sain avec la même roche dite « pourrie » on s'aperçoit que la caractéristique essentielle de cette altération observée sans exception dans les régions tempérées, est le changement d'aspect des feldspaths. Les feldspaths potassiques sont plus ou moins ternes et craquelés, sans toutefois perdre leur dureté, tandis que les plagioclases apparaissent complètement blancs, opaques et pulvérulents. Cet aspect correspond toujours à une perte plus ou moins grande de la cohésion de la roche allant en s'accroissant jusqu'à la désagrégation en ses minéraux à mesure qu'on se rapproche de la surface.



Profil de Romagnat (Puy-de-Dôme) sur granite porphyroïde à biotite.

Les biotites deviennent mordorées, dorées et même incolores, et le voisinage des lamelles se teinte en rouille, teinte qui s'étend quelquefois à l'ensemble de la roche ; cette altération s'intensifie vers la partie supérieure de l'arène.

Le quartz et la muscovite ne semblent pas altérés.

L'altération de la roche observée sur un front de carrière montre le plus souvent diverses formes d'hétérogénéité. D'abord, outre les filonnets de quartz et de feldspaths potassiques, ceux d'aplites et d'autres granites à grains fins qui traversent l'arène, ont conservé une grande cohésion malgré l'altération des feldspaths ; cependant, dans certains cas plus rares, certaines de ces roches peuvent perdre leur cohésion au point de pouvoir être brisées à la main, tout en restant plus cohérentes que l'arène encaissante.

La roche de massif elle-même présente souvent des zones moins altérées, voire même à peine altérées. Parfois on peut se rendre compte que ces zones correspondent à des parties protégées de l'action de l'eau du fait, par exemple, de leur éloignement

des fissures. Cet effet de l'eau est particulièrement net dans les carrières de pierre où l'arénisation peut se prolonger sur une largeur plus ou moins grande le long des fissures quelquefois très profondément. Rarement les zones moins altérées prennent la forme de blocs anguleux correspondant au réseau de diaclases.

Certains auteurs dont M. DERRUAU (1956) et P. DUFFAUT (1957) remarquent dans les arènes de certaines régions réputées pour leur paysage de rochers en boule comme le Sidobre et la Margeride ou la région de Guéret dans le Massif Central français,



Profil de Saint-Gervais (P.-de-D.) sur granite à biotite à gros grains.

l'existence de zones à contours arrondis d'un granite pétrographiquement identique à l'arène, mais parfaitement sain ou présentant tout au plus un début d'altération en zones concentriques pouvant se détacher en écailles.

Au cours de nos investigations dans le Massif Central, les Vosges et le Massif armoricain, il a été remarqué des différences dans l'intensité d'arénisation des granites suivant leur nature pétrographique. Ce sont les granites à biotites qui semblent s'aréniser le plus profondément. Les granites à deux micas s'arénisent également

bien, lorsque les grains sont assez gros, même lorsqu'ils sont pauvres en biotite. Les granites à amphibole paraissent subir cette altération moins intensément. A. RONDEAU (1956) constate en Corse méridionale que les granites rouges alcalins sont plus résistants que les granites gris calco-alcalins.

Il n'est pas sans intérêt d'attirer l'attention sur le fait que les galets de nos rivières sont généralement constitués de roches à structure fine ; cette remarque n'est pas valable pour les galets marins.

Enfin on doit signaler que la partie supérieure des arènes peut avoir subi des remaniements qui ont été étudiés en France dans le Nord du Morvan par J. ANDRÉ, J. DEJOU et M. SAJOT (1956) cité par J. DEJOU (1959). Les arènes remaniées sont parfois difficilement distinctes des arènes en place, et ce fait doit mettre en garde l'observateur à la recherche d'un profil d'altération ; la présence de filonnets s'avère une bonne garantie.

Outre la présence de racines de végétaux qui peuvent aller jusqu'à 2 m de profondeur et plus, on observe dans les diaclases, fissures ou poches des matériaux de nature très diverse. En mettant à part le remplissage par simple entraînement de la terre superficielle ou débris fins de la désagrégation, on peut grouper les autres en deux catégories. D'une part ce sont des matériaux très cohérents à aspect d'argiles pouvant présenter toutes les nuances de teintes depuis le blanc jusqu'au noir en passant par le jaune et le rouge ; ils peuvent remplir des fissures pouvant atteindre 10 centimètres et plus de large. D'autre part il s'agit de substances friables blanches, jaunes ou verdâtres, quelquefois plus ou moins panachées de rouille, remplissant des fissures de quelques millimètres et plus. Exceptionnellement, on a pu saisir l'origine de substances analogues à ces dernières dans une arène le long d'une fissure, siège d'une circulation d'eau. Tous les feldspaths étaient transformés en cette matière, la forme initiale des cristaux ayant été conservée. Seuls le quartz et les biotites mordorées restaient reconnaissables.

Signalons enfin les dépôts de source décrits par M. MORIN (1951) formés dans l'arène sous une petite tourbière ; ils comprennent un manteau ferrugineux surmonté à une distance variable d'une zone argileuse plus ou moins épaisse, rouge à la partie inférieure, bleue à la partie supérieure.

b) *Constitution granulométrique.*

La désagrégation des granites conduit à la séparation plus ou moins complète de leurs minéraux. Les minéraux peu altérés constituent la partie grossière, les minéraux pulvérisés forment la partie fine.

On a effectué sur ces matériaux des analyses granulométriques en suivant la méthode internationale utilisée pour les sols (1). Les résultats donnés dans le tableau 1 (profil I et II) correspondant à des profils relevés dans le Massif Central français (Puy-de-Dôme), montrent que la richesse en éléments les plus grossiers (fraction I et II) atteint de 80 à 90 p. 100, mettant en évidence la faiblesse de la proportion des

(1) Il faut signaler que d'après S. HENIN, et G. PEDRO (1957) le traitement à l'eau oxygénée employée dans cette méthode favorise la division des micas.

minéraux pulvérisés. La répartition granulométrique dans ces deux fractions dépend uniquement de la grosseur initiale des minéraux non désagrégés dans la roche. Les autres fractions sont d'autant plus faibles qu'elles sont plus fines ; en particulier la fraction colloïdale varie entre 1,6 et 4,6 dans les arènes étudiées.

Ces analyses correspondent à des échantillons d'arène prélevés plus ou moins au voisinage du sol. Sur un échantillon prélevé plus profondément à Romagnat, on remarque une augmentation de la fraction I aux dépens de II correspondant à une séparation moins complète des minéraux, et une diminution de moitié de la fraction V.

TABLEAU I

Composition granulométrique.

Horizons	Profondeur des prélèvements en mètre.	p. 100 de matière sèche									pH
		Fractions grossières				Total	colloïdales V	Total	Matières organiques	Total	
		I	II	III	IV						
		sup. à 2 mm	0,2 à 2	0,02 à 0,2	0,002 à 0,02		inf à 0,002				
I. — Profil de Romagnat (P. de D.) sur granite porphyroïde à biotite.											
Sol	0,00-0,08	25,1	26,8	18,5	9,6	80,0	12,1	92,1	5,1	97,2	6,1
Sous-sol	0,08-0,16	37,6	27,1	16,0	9,0	89,7	8,0	97,7	1,4	99,1	6,4
Arène superficielle	0,22-0,40	38,6	41,2	9,9	4,8	94,5	4,6	99,1	0,4	99,5	6,5
Arène profonde	env. 5,00	45,7	34,0	12,8	4,1	96,6	2,3	98,9	0,2	99,1	
II. — Profil de Saint-Gervais (P. de D.) sur granite à biotite à gros grains.											
Sol	0,00-0,18	19,8	36,3	16,5	11,2	83,8	11,0	94,8	4,1	98,9	5,6
Sous-sol	0,25-0,50	20,8	36,1	15,8	13,1	85,8	11,6	97,4	1,4	98,8	5,3
Arène	1,30-1,50	29,3	50,5	13,6	3,2	96,6	3,0	99,6	0,2	99,8	5,2
III. — Profil de Saint-Gervais (P. de D.) sur granite à deux micas à grains fins.											
Sol	0,00-0,15	29,8	30,1	19,6	8,0	87,5	8,1	95,6	3,4	99,0	5,7
Roche altérée	0,60-1,00	87,2	6,3	4,5	1,2	99,2	0,7	99,9	0,0	99,9	5,4

c) *Observations minéralogiques.*

Étude minéralogique comparée des roches saines et altérées.

L'examen au microscope polarisant a déjà été effectué depuis longtemps par les pétrographes. Ces premières observations sont notamment décrites par J. de Lapparent dans ses « Leçons de Pétrographie » (1923).

Dans son ensemble la lame mince de granite altéré montre une structure microscopique aussi nette que celle de la roche fraîche. On constate toutefois la présence de produits d'altération entre les plages de minéraux.

Le quartz reste sans changement.

Le trouble des feldspaths potassiques est dû à de multiples inclusions non cristallines de l'ordre de 1 à 3 μ de diamètre. D'après D. S. Korshinsky (1940) cité par G. Millot (1949) la présence d'un libelle mobile dans les plus grosses indiquent qu'il s'agit d'inclusions liquides.

TABLEAU 2

Composition chimique élémentaire et teneur en quartz de la partie minérale totale

Horizons	% total brut sec	% matières minérales sèches										Rapports moléculaires								Quartz % mat. minérales sèches
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	H_2O	$\frac{SiO_2}{R_2O_3}$	$\frac{Bases}{R_2O_3}$	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{SiO_2}{K_2O}$	$\frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$	$\frac{Fe_2O_3}{MgO}$	$\frac{MgO}{Na_2O}$	$\frac{Na_2O}{CaO}$	
Profil I																				
Granite de référence.	100	61,4	18,3	4,6	3,9	2,5	4,4	3,6	0,9	0,34	0,5	4,91	1,13	5,70	21,6	6,27	0,46	1,07	0,83	16,9
Arène profonde	98,8	63,7	17,9	4,1	1,8	2,2	4,8	2,5	0,9	0,22	1,9	5,32	0,89	6,07	20,8	6,84	0,47	1,36	1,25	18,2
Arène superficielle ...	99,1	65,4	16,4	4,1	0,52	1,6	6,0	1,8	1,1	0,23	2,9	5,82	0,76	6,78	17,1	6,30	0,64	1,38	3,11	17,5
Sous-sol	97,7	68,0	15,1	3,1	0,82	1,3	5,5	2,2	0,8	0,13	3,1	6,80	0,84	7,68	19,4	7,62	0,60	0,91	2,43	26,2
Profil II																				
Granite de référence.	100	67,8	15,6	2,5	1,9	1,6	5,2	3,5	0,6	0,24	1,1	6,70	1,10	7,39	20,5	9,80	0,39	0,71	1,66	24,9
Arène	99,6	66,8	17,1	2,5	0,74	1,4	5,1	2,3	0,7	0,23	3,2	6,05	0,76	6,61	20,5	10,8	0,45	0,94	2,80	22,5
Sous-sol	97,4	67,5	15,9	3,8	0,43	1,1	5,0	1,7	0,8	0,21	3,6	6,26	0,64	7,20	21,1	6,59	0,86	1,00	3,56	28,0
Sol	94,8	68,9	14,5	3,6	0,51	1,2	4,8	1,6	0,9	0,43	3,6	7,00	0,70	8,05	22,4	6,31	0,75	1,16	2,84	31,0
Profil III																				
Granite de référence.	100	69,3	16,3	2,1	0,44	0,87	4,5	3,5	0,6	0,17	2,0	6,70	0,77	7,22	24,1	12,2	0,60	0,39	7,21	28,6
Granite altéré :																				
I	87,2	67,9	16,0	2,0	0,62	1,2	4,7	3,2	0,5	0,15	2,0	6,68	0,84	7,20	22,6	12,6	0,42	0,58	4,66	27,5
II à V	12,7	67,7	17,2	2,9	0,39	0,87	4,4	2,7	0,6	0,16	3,1	6,02	0,64	6,67	24,1	9,33	0,82	0,51	6,23	26,1
Total	99,9	68,9	16,4	2,1	0,58	1,2	4,7	3,2	0,5	0,15	2,2	6,60	0,82	7,12	22,5	12,3	0,44	0,58	4,98	27,7
Sol :																				
I	29,8	70,0	15,6	2,4	0,44	0,87	4,9	2,9	0,6	0,14	2,3	6,93	0,76	7,61	22,4	10,2	0,69	0,47	5,94	27,3
II à V	65,8	67,7	16,1	3,9	0,29	0,84	4,4	2,0	0,7	0,24	3,7	6,18	0,58	7,14	24,1	6,47	1,16	0,65	6,21	31,6
Total	95,6	68,5	16,0	3,4	0,31	0,85	4,6	2,3	0,7	0,21	3,2	6,41	0,63	7,28	23,3	7,38	1,00	0,57	6,71	29,9

Les feldspaths plagioclases sont parfois corrodés et leur séricitisation n'apparaît généralement pas plus prononcée que dans les roches des carrieres. Il en est de même pour la chloritisation des biotites. Toutefois J. DEJOU (1959) observe une intensification de ces pseudomorphoses par altération météorique.

Les biotites encore noires conservent leurs caractères optiques et roentgénographiques, mais leurs clivages sont plus ou moins remplis d'exsudats ferriques ou titanés (limonite, oligiste, ilménite et rutile). Le passage de la couleur jaune d'or au blanc d'argent (bauéritisation) correspond à une augmentation de l'angle des axes optiques, à la décroissance du poids spécifique et de l'indice de réfraction, à la disparition du polychroïsme tandis que les rayons X décèlent l'apparition de la vermiculite (G. F. WALKER (1948-51)).

On trouve peu de travaux concernant les granites à deux micas ou les granites à amphibole. Citons J. R. BUTLER (1953) qui ne constate aucun changement aux rayons X sur les muscovites d'un granite altéré de Cornouaille (Angleterre) et la chloritisation de la hornblende d'un gabbro de la même région.

Étude minéralogique des fractions granulométriques.

Pour les fractions les plus grossières (I à III) l'examen à la loupe binoculaire, complété par le microscope polarisant pour la fraction la plus fine, permet de constater, avec la décroissance de la grosseur des grains, une augmentation des feldspaths, plagioclases et de la biotite aux dépens des quartz et des feldspaths potassiques. En ce qui concerne ces derniers minéraux, leur répartition dépend de leur dimension relative dans le granite initial. Dans la fraction III on observe parfois quelques granules de limonite ou d'oligiste.

L'étude des fractions IV est plus délicate. L. DEJOU a distingué au microscope polarisant dans un matériel analogue, du quartz, des feldspaths dont il est impossible de discerner la nature et beaucoup de biotite. La méthode par fusion au bisulfate voir plus loin) permet de préciser que les feldspaths potassiques prédominent largement sur les plagioclases.

Enfin les fractions V sont contituées principalement des minéraux nouveaux de nature argileuse que l'on détermine par les méthodes d'analyse thermo-différentielles, thermopondérales et rœntgénographiques. Dans les arènes granitiques on a généralement à faire à un mélange d'argiles où la kaolinite est souvent présente. Ainsi on a trouvé un mélange de kaolinite et d'illite pour le profil I, de kaolinite et d'une autre phyllite difficile à identifier (montmorillonite ou vermiculite) pour les profils II et III. Dans quelques arènes de la région du Champ de feu dans les Vosges, G. MILLOT (1949) a reconnu la coexistence de l'illite et de la montmorillonite d'une part, de l'halloysite et de la kaolinite d'autre part, tandis que la kaolinite est dominante sous les « Seignes ». Ces méthodes décèlent aussi des hydroxydes de fer, des micas et du quartz. Le résidu insoluble à l'acide sulfurique est composé à peu près uniquement d'un mélange de quartz et de feldspaths alcalins.

d) *Composition chimique.*

Comparaison des compositions globales de la roche saine et altérée.

La plupart des auteurs du début du XIX^e siècle se sont bornés à comparer la composition des feldspaths avec celle du kaolin.

TABLEAU 3

Composition chimique élémentaire par fraction granulométrique.

Fractions	% total sec	% matières minérales sèches										Rapports moléculaires	
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	H_2O	$\frac{SiO_2}{R_2O_3}$	$\frac{Bases}{R_2O_3}$
Arène superficielle du profil I													
I	38,6	70,6	14,7	1,9	0,52	0,83	8,2	2,1	0,6	0,21	0,28	7,59	0,92
II	41,2	65,8	15,1	5,2	0,58	2,1	4,8	1,7	1,4	0,07	3,0	6,07	0,79
III	9,9	55,9	19,1	7,5	0,73	2,0	4,7	2,1	1,8	0,13	6,0	3,97	0,63
IV	4,8	53,2	25,3	4,7	0,28	1,9	4,8	1,0	1,1	0,10	7,6	3,20	0,44
V	4,6	49,8	25,5	5,5	0,04	2,3	2,6	0,37	0,9	0,16	12,9	2,92	0,32
Sous-sol du profil I													
I	37,6	74,9	12,6	1,1	0,62	0,68	7,0	2,1	0,3	0,09	0,60	9,38	1,02
II	27,1	72,4	13,3	2,2	1,0	1,0	4,9	2,6	0,6	0,06	1,9	8,22	0,94
III	16,0	63,3	16,1	3,8	1,5	1,6	4,8	3,1	1,2	0,14	3,5	5,75	0,92
IV	9,0	52,2	21,6	7,1	0,50	2,8	4,2	1,3	2,1	0,17	8,0	3,37	0,57
V	8,0	46,6	22,8	9,3	0,07	3,0	3,2	0,40	2,1	0,54	12,0	2,74	0,41

TABLEAU 4

Composition chimique élémentaire des fractions colloïdales (V).

Horizons	% total minéral sec	% matière sèche										Rap. mol.		$\frac{Al_2O_3\ (V)}{Al_2O_3\ (tot)} \times 100$
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	H_2O	$\frac{SiO_2}{R_2O_3}$	$\frac{Bases}{R_2O_3}$	
							Profil I							
Arène profonde.	2,3	56,2	25,3	4,1	0,12	2,0	0,8	0,12	0,4	0,02	11,0	3,43	0,23	3,2
Arène superficielle	4,6	49,8	25,5	5,5	0,04	2,3	2,6	0,37	0,9	0,16	12,9	2,92	0,32	7,1
Sous-sol	8,2	46,6	22,8	9,3	0,07	3,0	3,2	0,40	2,1	0,54	12,0	2,74	0,41	12,4
							Profil II							
Arène	3,0	43,3	30,2	9,1	0,04	2,1	2,1	0,48	0,8	0,66	11,2	2,05	0,24	5,3
Sous-sol	11,9	42,7	27,0	10,8	0,00	3,5	2,5	0,34	2,0	0,49	10,7	2,15	0,36	20,2
Sol............	11,6	43,8	26,5	10,5	0,04	3,6	2,6	0,43	2,3	0,47	9,8	2,24	0,39	21,2
							Profil III							
Granite altéré :														
Total........	0,7	45,9	31,8	5,2	0,04	1,6	2,8	0,39	0,8	0,49	11,0	2,21	0,22	1,3
II à V	5,5													10,2
Sol :														
Total........	8,5	45,3	28,7	7,8	0,04	3,7	2,7	0,48	1,0	0,38	9,9	2,29	0,40	15,2
II à V	12,3													22,0

M. EBELMEN (1845) a fait porter ses analyses sur les parties saines et altérées de divers silicates et roches ; il constate que l'altération tend vers un silicate d'alumine hydratée.

G. E. MERILL (1895) puis E. BLANCK et ses collaborateurs (1926-32,) cités par A. DEMOLON (1936) constatent pour les granites des pertes de Si et des bases et l'augmentation de Al et Fe.

La difficulté d'une telle comparaison tient à ce que le granite de référence choisie n'a généralement pas rigoureusement la même constitution que celui qui a donné l'arène au point de prélèvement à cause de l'hétérogénéité des gisements. On peut déjà s'en rendre compte pour les profils I et II dont les analyses sont présentées au tableau 2. On voit que la diminition de Al et l'augmentation de K dans le premier profil, et la diminution de Si dans le second, ne peuvent s'expliquer par des phénomènes d'altération, qui ne sauraient produire que des effets contraires. Si cette hétérogénéité peut fausser gravement l'établissement de bilans globaux, même au point de masquer l'effet de l'altération comme on le verra plus loin, il n'en est plus de même quand il s'agit de mettre en évidence les pertes relatives des éléments les uns par rapport aux autres, d'un ordre de grandeur plus élevé.

Si dans l'ensemble on est frappé par la ressemblance de constitution entre roches et arènes, on observe nettement pour les deux profils des gains de H^2O et des pertes de Ca et Na auxquelles s'ajoutent celles de Mg pour le profil I.

Les rapports moléculaires donnent une idée de la mobilité relative des éléments. On peut les classer comme suit par ordre de mobilité croissante :

$$\text{Si, Al, K} \leqslant \text{Fe} < \text{Mg} < \text{Na} < \text{Ca},$$

celle de Ca étant largement plus élevée que les autres.

La particularité de ces résultats est la faible mobilité du potassium. J. DEJOU (1959) trouve des résultats analogues avec une mobilité du fer supérieure à celle du calcium ; la mobilité du fer paraissant, en effet, très variable suivant les cas.

Comparaison des fractions granulométriques entre elles.

Au tableau 3 sont présentées les compositions des 5 fractions de l'arène superficielle du profil I. Celles-ci peuvent varier suivant la constitution minéralogique de la roche et l'état d'altération des minéraux. Comme le montre la décroissance régulière des rapports SiO_2/R_2O_3 et Bases $/R_2O_3$ des fractions grossières aux fractions fines, on observe une diminution de Si et des bases compensée par une augmentation de Al et Fe ainsi que Ti, P et H_2O. A la fraction III correspond un maximum pour Na et Ca. Tout ceci confirme les observations minéralogiques précédentes.

L'importance des fractions I et II explique la prépondérance de leur composition sur la composition globale.

Dans les fractions colloïdales Al, Fe, Ti, P, Mg et H_2O se concentrent aux dépens des autres éléments ; ces fractions sont particulièrement dépourvues en Na et Ca.

On remarquera au tableau 4 que toutes les compositions des fractions V ont cette allure. En passant de l'arène profonde à l'arène superficielle du profil I, on constate un enrichissement en Fe, K, Ti et P.

Composition de minéraux isolés.

Feldspaths potassiques. — On a isolé les plus gros cristaux de la fraction I des sols (profils I et II) considérés comme milieu plus altérant que l'arène.

Microcline	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	H_2O	Total	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{Al_2O_3}{K_2O + Na_2O}$
Profil I.........	64,4	18,3	1,2	0,27	0,25	12,5	2,5	0,1	0,04	0,45	100,01	5,96	0,99
Profil II.........	63,4	18,2	1.6	0,21	0,54	12,9	2,5	0,1	0,08	0,65	100,18	5,93	1,02

L'analyse a donné pour les deux échantillons des compositions de feldspaths sodi-potassiques très voisines de la composition théorique aux impuretés près.

Feldspaths plagioclases. — H. MALTERRE (1940) avait analysé les feldspaths pulvérulents extraits d'un granite altéré provenant du même gisement que celui du profil I. Les teneurs en Na et Ca trouvées conduisent au calcul d'un feldspath à 22 p. 100 d'anorthite, laissant un important reste de silice et d'alumine. Comme il s'agit d'une andésine, à 30 à 50 p. 100 d'anorthite, il faut admettre que ce plagioclase a perdu une partie de ses bases.

Biotites. — D'après G. F. WALKER (1948-1951) l'altération chimique des biotites correspond à une perte de Fe précédée par une oxydation, une perte de Mg et de K et un gain d'eau.

Biotite	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	H_2O	H_2O (105°)	Total
saine......	34,97	5,64	15,30	2,81	21,23	0,16	8,83	1,09	0,27	7,17	3,03	0,31	100,81
altérée	38,18	4,79	15,88	18,88	2,99	0,15	4,92	1,22	0,46	3,66	6,70	2,38	100,21

Composition de dépôts d'altération.

Ci-dessous sont présentés les résultats d'analyses totales et au bisulfate de trois types différents de ces dépôts :

— un produit A blanc friable de fissure superficielle recueilli dans le Morvan près de Marigny-l'Église (Nièvre),

— un produit B lie de vin, très cohérent, de poche profonde, provenant du barrage de Sauviat (P.-de-D.),

— une concrétion C ocre -jaune de source prélevée par M. MORIN dans une tranchée de captage près de Guéret (Creuse).

On a calculé par différence la composition de la partie soluble au bisulfate contenant les phyllites.

On constate que ces dépôts sont différents entre eux autant par leur composition que par leur aspect. Ils contiennent tous un résidu insoluble dans le bisulfate plus ou moins important qui dépasse 50 p. 1000 dans la conrétion de source. Ce résidu est surtout riche en silice qu'accompagne un peu de feldspaths potassiques.

Les fractions solubles partagent avec les complexes d'altération des arènes et des sols, leur pauvreté en Ca et Na. Elles s'en distinguent nettement par leurs teneurs relatives en autres éléments et leur variabilité de composition : A est surtout potassique ; B est très riche en Fe, le reste est magnésien ; C est surtout magnésien.

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	H_2O	Total	$\frac{SiO_2}{Al_2O_3}$	$\frac{SiO_2}{(K, H_2)O}$	$\frac{SiO_2}{(FeMg)O}$
A														
total	57,0	24,6	2,0	0,08	1,2	9,2	0,9	0,4	0,06	3,7	99,1			
résidu bisulfate	23,4	6,8		0,06		4,6	1,4?				36,3			
soluble bisulfate	33,6	17,8	2,0	0,02	1,2	4,6	0,0	0,4	0,06	3,7	62,8	2,93	2,03	11,9
B														
total........	27,1	12,6	45,6	0,00	3,0	1,9	1,2	0,3	0,16	8,1	100,0			
résidu bisulfate	16,2	2,0		0,00		1,1	0,29				19,6			
soluble bisulfate	10,9	10,6	45,6	0,00	3,0	0,8	0,91	0,3	0,16	8,1	80,4	1,76	0,40	**2,45**(1)
C														
total	65,5	12,3	3,3	0,03	8,7	4,0	0,2	tr.	0,22	5,7	100,0			
résidu bisulfate	46,8	3,5		0,03		1,9	0,13				52,4			
soluble bisulfate	18,7	8,8	3,3	0,00	8,7	2,1	0,07	tr.	0,22	5,7	47,6	4,19	1,06	1,54

(1) Il n'a pas été tenu compte de Fe pour le calcul de ce rapport.

e) Tentative d'évaluation de l'intensité de l'altération chimique.

L'altération chimique d'un matériau rocheux se solde donc par une perte d'éléments chimiques et il demeure un résidu. Parmi ces éléments perdus une partie insoluble (complexe d'altération) reste sur place avec le résidu, tandis que le reste soluble ou pseudo-soluble ou simplement en suspension est éliminé ; une fraction de ce dernier pouvant s'insolubiliser ou floculer ou se déposer en d'autres points du gisement quelquefois relativement assez éloigné du point de formation.

Lorsqu'on cherche à connaître l'importance relative de ces opérations, on se heurte d'abord à une difficulté déjà signalée : l'échantillon de roche choisi comme référence est-il bien représentatif de l'état initial de l'échantillon altéré ? Il est nécessaire ensuite de trouver un repère de comparaison peu variable au cours des opérations d'altération.

A cet effet on a coutume de choisir les sesquioxydes de Al et de Fe chacun séparément ou leur somme, éléments considérés comme les moins mobiles (G. W. Robinson, 1936). Si l'on n'envisage qu'une simple appréciation du degré d'altération, on peut calculer le rapport des sesquioxydes du complexe d'altération aux sesquioxydes totaux de l'horizon. C'est ce qui a été réalisé avec Al_2O_3, le plus fixe des deux sesquioxydes, pour tous les horizons du profil (Tableau 4), en assimilant la fraction V

au complexe. Ce test a l'avantage de ne pas tenir compte de la composition de la roche de référence, mais il suppose que le complexe n'a subi aucune addition, ni soustraction de matière.

Dans le même esprit on peut aussi comparer les rapports de deux éléments dont l'un est moins mobile que l'autre, par exemple K Na (H. JENNY) (cité par G. W. ROBINSON) ou Na Ca (R. H. HAWKINS et E. R. GRAHAM, 1950). Entre autres inconvénients et pour ce qui nous occupe, ce procédé ne testerait pas suffisamment le degré d'altération de l'ensemble du matériau rocheux.

Si l'on désire serrer de plus près la réalité il faut utiliser un repère plus stable. En régions tempérées un minéral, le quartz, paraît particulièrement désigné par sa faible altérabilité.

La teneur en quartz peut se calculer d'après l'analyse chimique suivant les méthodes de détermination des minéraux virtuels utilisées par les pétrographes Mais la valeur du quartz ainsi obtenue s'éloigne plus ou moins de la réalité suivant les conventions de calcul, en particulier celles qui règlent la répartition du potassium. De plus l'erreur peut devenir très importante lorsqu'on l'applique à des roches altérées dans lesquelles certains minéraux sont plus ou moins vidés de leurs bases et des minéraux nouveaux apparaissent. Les bases étant plus mobiles que la silice, cette erreur sera toujours par excès et d'autant plus forte que la roche sera plus altérée. Les données établies d'après ces taux de quartz trop élevés auront donc tendance à exagérer l'importance de l'altération.

Aussi avons-nous cherché l'application à ces matériaux des méthodes chimiques de dosage du quartz dans les argiles. L'acide sulfurique ou ses sels acides ont la propriété d'attaquer à chaud fortement les phyllites et très peu le quartz et les feldspaths (D. COLLIER, 1953). Le résidu insoluble est donc un mélange surtout constitué par ces derniers minéraux. L'analyse chimique élémentaire de ce résidu permet de calculer facilement le quartz, puisque le potassium appartenant aux minéraux autres que l'orthose a été en grande partie dissous. Certes la séparation n'est pas rigoureusement quantitative, mais cet inconvénient est grandement atténué dans l'appréciation du degré d'altération de roches de même origine, puisque l'on n'utilise que les rapports des résultats obtenus Ces méthodes conviennent bien aux granites à micas, mais ne sauraient s'appliquer aux granites à amphibole, l'amphibole étant aussi résistant que les feldspaths à ces réactifs.

Les horizons des profils ont été ainsi étudiés en suivant la technique de G MILLOT (1949) (1) ; les résultats figurent au tableau II, dernière colonne.

A l'aide de ces données (Q) on peut déjà évaluer pour un horizon altéré (*a*) le pourcentage des pertes par rapport à la roche de référence (*r*) suivant l'expression (Tableau 5, première colonne) :

$$100\left(1 - \frac{Q(a)}{Q(r)}\right)$$

Ce calcul ne tient pas compte du gain d'eau et du fait que les éléments du complexe d'altération restés en place ne sont pas déduits du résidu.

En se basant sur ces considérations on a essayé d'établir quelques bilans globaux (Tableau 5). La fraction colloïdale (V) a été assimilée sans risque d'erreur importante

(1) La méthode dite aux trois acides de HARRISON-BAEYENS utilisée par les laboratoires de l'O. R. S. T. O. M. aurait donné des résultats analogues.

au complexe d'altération, car cette fraction ne contient qu'une faible proportion de minéraux du granite compensée d'ailleurs partiellement par les quelques minéraux nouveaux que renferment les fractions III et surtout IV. Les pertes totales ainsi calculées sont portées à la colonne 11.

D'autre part, si tout le complexe était resté en place on devrait avoir :

$$\frac{Q(r)}{Q(a)} = \frac{Al_2O_3(r)}{Al_2O_3(a)} \quad \text{d'où} \quad \frac{Al_2O_3(r)}{Al_2O_3(a)}\,\frac{Q(a)}{Q(r)} = 1.$$

La valeur de ce rapport serait supérieure ou inférieure à l'unité suivant que les apports de complexes provenant de l'extérieur sont inférieurs ou supérieurs aux départs (Tableau 5, dernière colonne). Enfin on a cherché à évaluer ce mouvement en admettant pour les complexes d'importation ou d'exportation la même teneur en alumine que le complexe en place. Cela a finalement permis le calcul des éléments solubilisés et des gains d'eau totaux.

Cette méthode a eu au moins le mérite de mettre en évidence que l'hétérogénéité des gisements était suffisante pour rendre sans valeur l'établissement de bilan. Dans le profil I l'analyse au bisulfate avait montré par ailleurs que le taux d'orthose croît par rapport au quartz quand on passe du granite à l'arène ; ce qui ne peut se comprendre qu'en admettant que le granite de référence soit plus alumineux que le granite arénisé. On a ainsi l'apparence d'un départ de complexe conduisant à une réduction du taux des éléments solubilisés, au point que ce taux devienne négatif dans l'arène superficielle, ce qui est absurde. Des différences sensibles apparaissent même entre l'arène profonde et l'arène superficielle, c'est-à-dire à quelques mètres de distance, $(100\left(1 - \frac{Q(r)}{Q(a)}\right)$ plus petit pour l'arène superficielle que pour l'arène profonde).

Pour le profil II, le granite de référence est plus quartzeux que celui de l'arène, et la différence est suffisante pour masquer l'effet de l'altération globale. $(100\left(1 - \frac{Q(r)}{Q(a)}\right)$ devient négatif).

Pour l'évaluation de l'intensité de l'altération chimique il reste donc préférable d'utiliser des tests ne se référant pas à la roche saine, tel simplement le taux d'argile ou encore le rapport $\frac{Al_2O_3\ V}{Al_2O_3\ \text{tot.}}$.

On voit donc (tableau 4) que l'altération chimique reste très faible dans les arènes même superficielles.

Il faut signaler une autre méthode de détermination des bilans chimiques d'altération : la *méthode isovolumétrique.* Cette méthode appliquée pour la première fois par E. C. J. Mohr (1938) (cité par M. Bonifas) suppose que l'altération ne modifie pas le volume d'un matériau rocheux, mais sa densité apparente. Cette méthode a été encore utilisée récemment par M. Bonifas (1958) et N. Leneuf (1959) pour l'étude de la latérisation (voir plus loin), pour laquelle une référence chimique ou minéralogique est encore plus difficile à trouver. Bonifas constate que les tassements ou gonflements possibles sont inappréciables au microscope et que les erreurs sont faibles. Leneuf pense que s'il en est ainsi au stade du blanchiment, le stade de l'argile tacheté doit correspondre à un accroissement sensible du volume. En effet en se basant d'une part sur les teneurs en alumine et d'autre part sur les densités apparentes de la roche et de l'argile, il calcule qu'un dm_3 de granite devrait donner 1,18 dm_3 d'ar-

TABLEAU 5

Essais de bilans globaux d'altération.

Nature des matériaux rocheux		$100\left(1-\frac{Q(r)}{Q(a)}\right)$	% granite de référence sec																$\frac{Al_2O_3(r)Q(a)}{Al_2O_3(a)Q(r)}$
Choisis pour base	Comparés		Total			Complexe d'altération (V)			Résidu d'altération			Pertes anhydres					Éléments solubilisés	Gain total H_2O	
				H_2O	an-hydre		H_2O	an-hydre		H_2O	an-hydre	appa-rente	to-tale	Comp. alt^on apporté ou entraîné					
														to-tal	H_2O	anhydre			
			(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	
									Profil I										
Granite de référence	Arène profonde	7,2	92,8	1,8	91,0	2,1	0,2	1,9	90,7	1,6	89,1	8,5	10,4	7,5	0,8	6,7	1,8	2,1	1,12
Granite de référence	Arène superficielle	3,4	96,6	2,8	94,3	4,4	0,6	3,8	92,2	2,2	90,0	5,7	9,5	9,4	1,2	8,2	— 2,5	3,5	1,15
Granite de référence	Sous-sol	35,5	64,5	2,0	63,0	5,3	0, 6	4,7	59,2	1,4	58,8	37,0	41,7	37,7	4,5	33,2	3,8	6,0	1,89
									Profil II										
Granite de référence	Arène	— 11,0																	0,83
Granite de référence	Sous-sol	11,1	88,9	3,3	85,6	10,6	1,1	9,5	78,3	2,2	76,1	13,3	22,8	5,6	0,6	5,0	8,0	2,8	1,10
Granite de référence	Sol	19,6	80,4	2,9	77,5	9,3	0,9	8,4	71,1	2,0	69,1	21,4	29,8	15,1	1,5	13,6	7,8	3,3	1,34
									Profil III										
Granite altéré (I)	Granite altéré (II à V)	— 5,0																	0,88
Sol (I)	Sol (II à V)	13,6	86,4	3,2	83,2	10,6	1,1	9,5	75,8	2,1	73,7	14,5	24,0	5,9	0,6	5,3	9,2	1,5	1,12
Granite altéré (I)	Sol total	8,0	92,0	2,9	89,1	7,8	0,8	7,0	84,2	2,1	82,1	9,9	15,9	4,5	0,4	4,1	5,8	1,3	1,09

$(1) = 100\,\frac{Q(r)}{Q(a)}$ $\quad (4) = V(a)\,\frac{Q(r)}{Q(a)}$ $\quad (7) = (1) - (4)$ $\quad (10) = [100 - H_2O(r)] - (3)$ $\quad (11) = (10) + (6)$

$(12) = \left[Al_2O_3(r) - Al_2O_3(a)\,\frac{Q(r)}{Q(a)}\right] \frac{100}{Al_2O_3\ (V)}$ $\quad (15) = (10) - (14)$ $\quad (16) = (2) + (13) - H_2O(r).$

gile tachetée. L'arène correspondant au stade blanchiment, l'application de cette méthode au problème qui nous occupe, serait peut-être plus avantageuse.

2. — GRANITES NON ARÉNISÉS.

On a vu que les régions granitiques, caractérisées par leur topographie arrondie, peuvent présenter des boules en saillie constituées par un granite en bon état de conservation, alors que tout le granite environnant apparemment de même nature, est



Profil de Saint-Gervais (P.-de-D.) sur granite à deux micas à grains fins.

arénisé sous une plus ou moins grande profondeur. Précisons que la présence de boules est loin d'être une caractéristique générale des pays granitiques, elles sont liées seulement à certaine nature de gisements.

D'autres granites donnent au contraire une topographie heurtée. Lorsqu'ils se présentent en filons au sein des premiers, ils en forment les crêtes et les éperons rocheux et peuvent être aussi à l'origine de chaos de rochers non arrondis cette fois. Ces granites, eux aussi, ne sont pas arénisés ; ce sont généralement des granites à

grains fins très siliceux, c'est-à-dire pauvres en plagioclases et en biotite, comme les roches formant les petits filons dans les carrières d'arène précédemment décrites C'est ce type de granite qui va servir d'exemple dans cette étude.

a) *Aspect de la roche altérée et constitution granulométrique*

Ces roches étant généralement en saillies dégagées par l'érosion du granite encaissant arénisé, les profils d'altération sont assez rares et ne peuvent se rencontrer que sur de puissants filons. Un tel profil montre la roche massive à faible profondeur (2 à 3 m) altérée seulement au bord des fissures sur une épaisseur de quelques millimètres seulement. De bas en haut, on observe une intensification et un élargissement des fissures remplies des produits de désagrégation de la roche, tandis que l'altération (sans désagrégation) gagne progressivement toute la masse des blocs. Tel est à quelques détails près le type de profil d'altération que l'on retrouve pour toutes les roches ne s'arénisant pas comme les roches éruptives à structure microcristalline ou les roches sédimentaires comme les grès, schistes ou calcaires.

Comme dans l'arénisation, l'aspect altéré est donné par la perte de l'éclat cristallin et de la cohésion des plagioclases, laquelle ne conduit pas ici à la désagrégation massive de la roche, mais seulement à une désagrégation superficielle et progressive à partir des parois des fissures. Celle-ci n'atteint d'ailleurs qu'une très faible partie de l'ensemble.

On peut s'en rendre compte par l'examen de la constitution granulométrique au niveau 0,60-1 m du profil III (tableau 1) où le pourcentage de roche cohérente (fraction I) voisine 90, tandis que la fraction colloïdale n'atteint que 0,7 p. 100 de l'horizon total.

b) *Observations minéralogiques.*

La fraction I est entièrement constituée de blocs plus ou moins volumineux de roche altérée mais encore très cohérente. Dans les fractions II et III on retrouve tous les minéraux de roches, quelques-uns étant encore adhérents les uns aux autres.

L'examen comparatif au microscope polarisant entre la roche mère et les fractions I, II et III permet de retrouver les constatations essentielles effectuées sur les granites arénisés.

c) *Composition chimique.*

Dans l'exemple donné au tableau 2, sont présentés séparément en comparaison avec le granite de référence : le granite altéré des blocs (fraction I), le granite désagrégé des fissures (fractions II à V) et l'horizon total.

On n'observe aucune différence entre le granite de référence et le granite des blocs, si ce n'est que ce dernier est un peu plus basique par suite probablement de l'hétérogénéité du gisement. Il est donc préférable de choisir ce dernier pour la comparaison avec le granite désagrégé.

On remarque, comme pour les arènes, une hydratation et une perte des trois éléments : Mg, Na et Ca mais un gain de Fe probablement par importation ; l'ordre de mobilité relative croissante est un peu différent :

$$Al < K < Si < Mg < Na < Ca.$$

Le degré d'altération dans le granite désagrégé est légèrement plus élevé que dans les arènes mais il est beaucoup plus faible pour l'horizon total (tableau 4, première et dernière colonne, et tableau 5).

3. — SOLS GRANITIQUES.

La simple observation d'un profil de terrain suggère immédiatement l'importance de l'intervention des facteurs biologiques dans la formation du sol. Celui-ci représente le stade le plus avancé d'altération de la roche, c'est seulement dans ce sens qu'a été orientée la présente étude.

Pour faire des comparaisons valables avec la roche mère, il convient que le sol qui la surmonte n'ait reçu aucun apport. ni subi aucun départ. Cela nécessite une situation topographique exceptionnelle en pays granitiques où les surfaces approximativement horizontales sont rares. Aussi les sols granitiques sont-ils rarement en place, tel est le cas du sol du profil I comme le montre sa constitution minéralogique et chimique ; des calculs de bilans l'ont mis en évidence sur d'autres profils. Par contre, on peut admettre que les sols des profils II et III se trouvent à peu près dans la situation recherchée.

a) *Aspect des profils.*

Sol sur arène. — L'arène passe assez brusquement à une zone où la distribution des minéraux de la roche (conservée dans l'arène) est détruite ; elle est surmontée d'une zone humifère plus sombre.

On conviendra d'appeler ces zones respectivement sous-sol et sol. Cet aspect est celui que l'on rencontre le plus communément pour les sols granitiques de plateau, de croupe, de palier, de pente faible. C'est le cas du profil II. Les sols sont épais de 20 à 30 centimètres, tandis que les sous-sols de profondeur très variable peuvent atteindre jusqu'à 1 mètre.

Il faut mentionner que les profils peuvent présenter un horizon plus argileux, ou encore dans l'arène sous-jacente des zones colorées rouille ou rouge brique réparties d'une façon continue ou suivant un réseau plus ou moins serré. A la coloration rouge brique correspond une consolidation de l'arène, faits qui en France sont surtout observables à l'Ouest du Massif Central et en Bretagne (Berthois, 1949). Il s'agit là de phénomènes d'ordre pédologique.

Sol sur granite non arénisé. — Un sol caillouteux peu profond (20 à 30 cm) repose directement sur la roche fissurée.

b) *Constitution granulométrique*

Le passage de la roche mère au sol se manifeste par une diminution de grosseur de l'ensemble des particules et une brusque augmentation des matières organiques et des colloïdes dont le taux reste cependant faible (tableau 1).

Les sols d'arène sont graveleux, la dimension des graviers dépendant de la grosseur du grain du granite initial, tandis que les sols sur roches non arénisés sont caillouteux.

Les sols granitiques sont en effet toujours riches en éléments grossiers, caractère qu'ils partagent d'ailleurs avec la plupart des sols de roches éruptives et métamorphiques.

c) *Constitution minéralogique.*

Dès 1904, A. DELAGE et H. LAGATU eurent les premiers l'idée d'examiner au microscope polarisant des sols en lame mince ; ils constatèrent que les minéraux s'y trouvent dans le même état que dans la roche mère.

C'est la même impression que l'on éprouve en observant les fractions I à III d'un sol granitique ; cependant il faut noter les différences suivantes :

— augmentation du craquellement des quartz et surtout des feldspaths potassiques,

— forte diminution des biotites et surtout des feldspaths plagioclases,

— biotites plus décolorées, feldspaths calciques plus corrodés,

— augmentation de la limonite et apparition de la séricite dans le fraction III.

La fraction V, qui s'est accrue considérablement, est constituée comme celle de l'arène ; en particulier le minéral argileux que l'on y rencontre le plus fréquemment est la kaolinite. C'est aussi la kaolinite qu'ont caractérisée G. S. HOSKING (1940) en Australie, L. T. ALEXANDER (1939) dans les sols podzoliques de Cecil (États-Unis), J. DEJOU (1959) dans les sols du Morvan. Par contre d'autres argiles deviennent prépondérantes dans d'autres stations. W. P. KELLEY (1939) (cité par J. R. BUTLER) et I. STEPHEN (1952) trouvent de l'illite dans les sols respectivement de Hanford (Californie) et de Malvern (Angleterre). J. R. BUTLER (1953) donne la constitution minéralogique suivante de l'argile 2 μ d'un sol granulitique des Cornouailles (Angleterre) : illite 35 p. 100, vermiculite et mica intermédiaire 35 p. 100, kaolinite 15 p. 100 chlotite 5 p. 100, quartz 2 à 5 p. 100, feldspaths 2 à 5 p. 100.

d) *Composition chimique.*

On est frappé par la faible différence de composition entre le sol et sa roche mère (voir tableau 5) (D. COLLIER ,1949). Malgré l'accroissement de l'altération des minéraux visible au microscope, outre un petit accroissement de l'hydratation, il n'apparaît qu'une faible accentuation de la perte de trois éléments : Mg, Na et Ca. Bien souvent même on constate au contraire une augmentation portant notamment sur Fe, Ca, Ti et P, plus nette dans le sol que le sous-sol due vraisemblablement aux matières organiques dont les sols non cultivés des profils de carrière sont abondamment pourvus.

L'analyse par fractions granulométriques montre une distribution des éléments rappelant celle de l'arène (tableau 3).

Enfin les colloïdes des sols sont plus riches en fer, magnésium, potassium et titane que ceux des arènes (tableau 4).

e) *Degré et bilan d'altération chimique.*

Quelque soit le critère choisi, le passage au sous-sol ou sol correspond, pour les trois profils à un brusque accroissement de l'altération chimique (tableau 4 première et dernière colonne, et tableau 5 : première colonne). L'influence de l'altération devient donc partout supérieure aux différences dues à l'hétérogénéité du gisement et les bilans globaux peuvent avoir quelque signification au moins dans les profils II et III où les sols sont apparemment en place (tableau 5).

TABLEAU 6

Essais de bilan chimique par éléments.

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	P_2O_5	H_2O	Total	Total anhydre
	% du granite de référence sec.											
1. Granite de référence	67,8	15,6	2,5	1,9	1,6	5,2	3,5	0,6	0,24	1,1	100,0	98,9
2. Sol	55,4	11,6	2,9	0,4	1,0	3,9	1,3	0,7	0,35	2,9	80,4	77,5
3. Pertes apparentes	12,4	4,0	— 0,4	1,5	0,6	1,3	2,2	— 0,1	— 0,11	— 1,8	19,6	21,4
4. Complexe d'altération en place	4,1	2,6	1,0	0,0	0,3	0,2	0,0	0,2	0,04	0,9	9,3	8,4
5. Résidus d'altération	51,3	9,0	1,9	0,4	0,7	3,7	1,3	0,5	0,31	2,0	71,1	69,1
6. Pertes totales	16,5	6,6	0,6	1,5	0,9	1,5	2,2	0,1	— 0,07	— 0,9	28,9	29,8
7. Complexe entraîné	6,6	4,0	1,6	0,0	0,5	0,4	0,1	0,3	0,07	1,5	15,1	13,6
8. Éléments solubilisés	5,8	0,0	— 2,0	1,5	0,1	0,9	2,1	— 0,4	— 0,18	— 3,3	4,5	7,8
	% de chacun des éléments du granite de référence.											
5. Résidus d'altération	75,6	57,7	76,0	21,1	43,7	71,1	37,1	83	129	182	71,1	
3. Pertes apparentes	18,3	25,6	— 16,0	78,9	42,5	25,0	62,9	— 17	— 46	— 165	19,6	
4. Complexe d'altération en place	6,1	16,7	40,0	0,0	18,7	3,9	0,0	33	17	82	9,3	
7. Complexe d'altération entraîné	9,7	25,6	64,0	0,0	31,3	7,7	2,9	50	29	136	15,1	
8. Éléments solubilisés	8,6	0,0	— 80,0	78,9	6,3	17,3	60,0	— 66	— 75	— 300	4,5	
6. Pertes totales	24,4	42,3	24,0	78,9	56,3	28,9	62,9	17	— 29	— 82	28,9	

Dans ces conditions on a cru intéressant de présenter pour le profil II le bilan complet par élément chimique du granite du sol, avec le pourcentage de pertes pour chacun d'eux (tableau 6). Ces chiffres n'ont évidement qu'une valeur relative, mais ils mettent bien en évidence l'ensemble des processus chimiques dont la plupart ont déjà été signalés précédemment. Les nombres négatifs signifient que les gains sont supérieurs aux pertes : outre l'eau, c'est encore le cas du fer, du titane et du phosphore. Le fer ferreux n'ayant pas été dosé, les gains d'oxygène n'ont pu être évalués.

4. — ALTÉRATION DES GRANITES DANS D'AUTRES RÉGIONS CLIMATIQUES.

Afin de préciser les particularités de l'altération des granites en pays tempérés, il a semblé utile de présenter brièvement l'altération de ces roches dans d'autres régions climatiques.

Étant donné la rareté des travaux relatifs à l'altération des granites en pays froids ou secs, on s'est trouvé dans l'obligation de se référer le plus souvent à ceux se rapportant à d'autres roches ou aux matériaux rocheux en général.

I. — *Régions arctiques et de hautes montagnes.*

Sur les pentes des affleurements et des crêtes les produits de l'altération des roches restent très grossiers depuis les blocs jusqu'aux cailloutis formant des coulées ou des éboulis ; ces fragments de roche peu altérés chimiquement sont accompagnés d'une faible quantité de produits fins (P. BOUT, 1953).

Dans la toundra ou la taïga où le sol est dégelé une partie de l'année, on constate déjà une certaine altération chimique n'intéressant, il est vrai, que les couches superficielles très humifères et très acides, mise en évidence par l'accroissement sensible de la fraction colloïdale, de l'hydratation, de l'oxydation et de la perte des bases (V. O. TARGULLAN, 1959).

En ce qui concerne les roches protégées par des glaciers ou une zone gelée toute l'année, nous citerons une observation personnelle : lorsqu'on emprunte le chemin de fer de la Jungfraujoch en Suisse, dans le tunnel (altitude 2300 à 3500 m) dont la construction a été terminée en 1912, on est frappé par la fraîcheur de coupe de la roche calcaire complètement dépourvue de trace d'infiltration d'eau.

II. — *Régions désertiques et subtropicales.*

L'altération chimique est également faible là où l'absence d'eau est due à la faible pluviosité et la grande évaporation. De MARTONNE cite d'après JULIEN l'exemple de cet obélisque de syénite qui se dressait en Égypte depuis plusieurs milliers d'années sans présenter la moindre altération, et qui, transporté à New York, se recouvrit rapidement d'une épaisse couche altérée.

Cependant on observe des phénomènes de desquamation, c'est-à-dire de séparation brusque d'écailles de roche, auxquels s'ajoute, dans les régions subtropicales pour les roches grenues, une désagrégation granulaire superficielle accompagnée d'une certaine altération chimique, cause de la formation de la patine désertique (P. BIROT, 1950). Mais l'altération reste surtout physique et aboutit à des amas de pierres et de sable.

III. — *Régions tropicales.*

La littérature concernant l'altération des roches dans les contrées chaudes et humides est plus importante. Néanmoins pour les granites les travaux restent assez rares, car c'est l'étude propre du phénomène de *ferralitisation* (latéralisation)qui a intéressé les auteurs, et comme on le verra plus loin les latérites vraies, presque uniquement constituées d'hydroxydes d'alumine et de fer, se forment surtout aux dépens des roches basiques.

Cependant les travaux de A. LACROIX à Madagascar (cité par J. de LAPPARENT, 1923), de J. B. HARRISSON, en Guinée britannique (1934) (cité par E. C. J. MOHR et F. A. Van BAREN, 1934), de G. CLAISSE en Côte d'Ivoire (1953), de B. P. RUXTON et L. BERRY à Hong-Kong (1957), et surtout la thèse récente et très documentée de N. LENEUF également en Côte d'Ivoire (1959), nous ont permis de présenter une synthèse de l'altération des granites dans ces régions.

a) *Aspect des profils.*

Schématiquement un profil d'altération massive en terrain normalement drainé se présente comme suit :

Au-dessus de la roche saine mais déjà en voie d'altération le long des diaclases, on observe des blocs de roches encore non altérées sauf à la périphérie, environnés d'une arène où subsiste la structure de la roche ; les zones d'altération des bords des diaclases et des blocs comprennent généralement une *partie blanchie* et une *croûte brun-jaune* ou *brun-rouge* (ou cortex) déjà friable.

Les noyaux anguleux et presque jointifs à la base deviennent de moins en moins volumineux et de plus en plus arrondis vers la partie supérieure, tandis que l'arène devient de plus en plus argileuse et la structure de la roche de moins en moins reconnaissable ; c'est l'horizon *d'argile tachetée* ou *lithomarge* de certains auteurs. Il ne sera pas question ici des évolutions pédologiques intéressant le sommet de cet horizon, en relation avec les modalités du climat et la couverture végétale.

Ce profil d'altération est variable avec les conditions topographiques et la nature de la roche mère. Là où l'érosion n'est pas active la roche est altérée sur une plus ou moins grande profondeur pouvant atteindre 50 m et plus. En pays accidenté l'horizon supérieur peut être remanié, et suivant la situation topographique être complètement érodé ou présenter une épaisseur considérable par suite du colluvionnement. Sur les dômes granitiques où une grande partie de l'eau de pluie ruisselle, on observe une zone d'altération progressive de profondeur variable pouvant atteindre quelques décimètres, recouverte par une croûte brun-jaunâtre ; parfois la surface de la roche se détache en écailles (desquamation). Enfin, dans les terrains mal drainés, le profil d'altération s'arrête au niveau inférieur de la nappe phréatique présentant à la base des horizons verdâtres.

La roche mère intervient surtout par sa basicité. Ainsi sur les roches basiques le passage de la roche mère à la *latérite* se fait brusquement comme l'avait déjà remarqué A. LACROIX. En ce qui concerne les granites, d'après les documents consultés, on peut simplement dire que les croûtes d'altération et les taches de l'horizon argileux sont d'autant moins colorées que la roche est plus pauvre en minéraux ferromagnésiens ; ainsi il existe des *argiles latériques* presque blanches.

b) *Constitution granulométrique.*

On retiendra seulement que le taux de la fraction inférieure à 2 μ dans l'argile tachetée est de l'ordre de 20 p. 100 à 50 p. 100 ; en-dessous de cet horizon ce taux décroît progressivement.

c) *Examens minéralogiques.*

La première phase d'altération de la roche, début de son blanchiment, correspond à la formation des fines fissures principalement dans les plagioclases ; ceux-ci peuvent souvent présenter une intensification de la séricitisation. On décèle déjà dans la fraction < 2 μ un produit kaolinique : la métahalloysite et un peu de gibbsite.

L'accentuation du blanchiment est due à une extension de la microdivision, aux microclines et même aux quartz, mais surtout à l'intensification de la kaolinisation des feldspaths, toujours accompagnés de la formation de gibbsite, de gel d'hydroxydes (et parfois d'un peu d'illite). Il faut attribuer à cette altération l'aspect crayeux pris par ces feldspaths.

Tous les auteurs sont d'accord pour remarquer que les microclines sont plus résistants que les plagioclases. Les minéraux ferromagnésiens se chargent d'hydroxydes ferriques. lesquels peuvent migrer dans les microfissures de la roche en leur voisinage, expliquant ainsi les teintes rouilles parfois observée. Seuls les quartz et les muscovites ne paraissent pas altérée chimiquement.

Les croûtes colorées qui succèdent aux zones blanchies montrent une altération plus avancée. On retrouve la métahalloysite et la gibbsite, mais des gels d'hydroxydes plus riches en fer et la présence d'un peu de goethite caractérisent ce stade d'altération.

Enfin l'argile tachetée se singularise par la présence massive de kaolinite accompagnée de gibbsite et de goethite (et de gels d'hydroxydes), d'autant plus que la roche est plus basique. La montmorillonite peut se former pour les granites les plus basiques dans des conditions de mauvais drainages. Les minéraux résiduels sont toujours le quartz qui constitue la majeure partie des fractions grossières et suivant la nature de la roche, la muscovite et la hornblende.

d) *Composition chimique.*

La comparaison de la roche saine avec l'argile tachetée (altération kaolinique gibbsitique) permet de constater, outre des gains d'eau et d'oxygène, des pertes d'une partie de la silice et de la presque totalité des quatre bases. Les particularités de cette altération résident dans la solubilisation d'une partie du quartz et l'importance des pertes en K ; cependant au stade du blanchiment les taux de K et même de Na peuvent s'accroître. L'ordre de mobilité relative croissante des éléments se présente comme suit :

$$Si < K — Mg < Ca — Na.$$

Les rapports moléculaires SiO_2/Al_2O_3 des fractions inférieures à 2 μ sont voisins de 2 et d'autant plus que la roche est davantage leucocrate.

TABLEAU 7

Composition chimique élémentaire de quelques eaux naturelles et de lixiviation en contact avec les roches éruptives.

	pH			Résistivité ohms (cm) cm² à 20°			Concentration en mg par litre															Rapport équivalentaire					
							SiO_2			Ca			Mg			K			Na			$\frac{Na}{K}$			$\frac{K + Na}{Ca + Mg}$		
	Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.	Max.	Min.	Moy.
Eaux issues de roches cristallines																											
Creuse (D. CHATONIER)																											
21 échantillons	6,4	5,35	5,75	48900	3510	22827	41	11	22	30	1,1	5,3	10,9	0	1,1	3	0,3	0,94	19,2	2,3	5,75	20	0,94	11,8	12,7	0,101	3,43
Côte d'Ivoire (G. ROUGERIE)																											
Granites alcalins							17,8	4,7	12,2	6,0	1,2	3,9	36,5	9,1	21,8	16,0	7,0	12,1	15,9	3,0	12,2						
Granites gnessiques							28,1	6,6	11,2	35,4	1,4	5,2	36,5	tr	18,7	6,6	2,3	4,0	40,7	1,1	12,3						
Granites à hypersthène ..							10,5	7,5	11,4	3,0	1,0	1,7	24,3	tr	10,6	3,9	0,8	2,0	16,6	0,7	2,8						
Eaux issues de roches volcaniques																											
Chaîne des puys, Cézallier, Cantal (D. CHATONIER)																											
22 échantillons	7,3	6,8	7,0	25680	4930	9019	48	21	38	14,6	2,8	9,2	10,1	1,6	5,4	9,5	1,2	5,5	12,8	3,5	9,2	5,50	2,05	4,4	1,46	0,16	0,75
Eaux de lixiviation de granites (D. CHATONIER)																											
Guéret					5 200			19			11,6			3			27			7			0,43			1,19	
Évaux-les-Bains........					7 200			15			8,8			2,8			17,5			7,9			0,75			1,21	
« Les Pinardes »					9 400			28			11,2			1,6			7,8			4			0,85			0,53	
La Mazeire............					8 300			14			8,8			1			17,6			7,3			0,68			1,46	
Eaux de lixiviation de roches volcaniques (D. CHATONIER)																											
Argnat					6 200			20			9,9			5,7			8,4			13			2,66			0,80	
Balmet					5 690			25,5			11,4			2,3			11,9			10,6			2,53			1,39	
Louchadière					4 500			21			13,7			4,9			13			18,7			2,45			1,05	
Volvic					6 450			22,5			9,5			5			8			11,1			2,40			0,77	

e) *Degré d'altération chimique.*

Les taux des fractions inférieure à 2 μ de l'argile tachetée montre déjà le degré élevé d'altération chimique atteint dans ces régions, mais il n'en donne qu'une estimation incomplète, car le complexe d'altération n'est pas réduit à ces fractions ; seul le soluble aux trois acides permet de fixer les idées aux erreurs près signalées précédemment : il est compris entre 40 et 80 p. 100.

5. Composition chimique élémentaire des eaux de terrains cristallins.

Une partie des éléments libérés des roches en voie d'altération étant entraînés par les eaux de drainage, il n'était pas sans intérêt d'examiner leur composition. Nous avons surtout retenu la thèse récente et bien documentée de D. Chatonier (1957) qui s'était proposé la comparaison des compositions des eaux issues des terrains cristallins (Creuse), volcaniques (Chaîne des Puys, Cézalier et Cantal) et calcaires (Lot), avec celles des roches encaissantes.

Suivant H. Schoeller (1956) cité par l'auteur la composition des eaux ne dépend pas seulement de la nature des roches, mais aussi de la température, des surfaces et temps de contact, des réactions secondaires et en particulier des phénomènes d'échange.

D. Chatonier constate que les compositions des eaux cristallines étudiées (surtout d'eaux de sources) sont assez homogènes : par rapport aux autres eaux analysées (tableau 7) elles sont les plus acides et les moins minéralisées, leurs rapports équivalentaires Na/K et Na + K/Ca + Mg sont largement plus élevés et ne sont pas en relation avec ceux des roches en contact comme pour les eaux volcaniques.

Un étude parallèle sur la composition des eaux de nappes des pays tropicaux a été entreprise en Côte d'Ivoire forestière par G. Rougerie (1960). Approximativement les teneurs en bases totales et en silice suivent la richesse des roches en bases ; elles sont du même ordre de grandeur qu'en France pour la même nature de roche ; pour les granites il est intéressant de remarquer que les teneurs en K et Mg par rapport à Na et Ca sont nettement plus élevées. Des variations saisonnières sont observées : deux périodes de maxima correspondant aux saisons sèches avec un décalage des bases par rapport à la silice ; en France l'auteur (1961) a constaté aussi une variation saisonnière avec une seule période de maxima en été.

D'après les analyses d'eaux de source ou de nappe données par N. Leneuf (1959) également pour la Côte d'Ivoire, certaines de ces eaux sont plus alcalines, plus minéralisées, plus riches en silice et avec, également des rapports Na/K plus faibles qu'en pays tempérés.

B. — EXPÉRIENCES.

I. — Altération chimique des minéraux et des roches silicatés.

Il suffit de consulter le traité de E. Blanck (1929) pour se rendre compte du nombre d'auteurs du XIXe siècle et du début du XXe siècle qui ont tenté d'étudier au laboratoire l'altération chimique des silicates.

Ces premiers chercheurs essaient de se rapprocher des conditions naturelles par l'emploi d'eau additionnée fréquemment de gaz carbonique et parfois d'acides

ou de sels dilués, qu'ils ont fait agir sur la substance plus ou moins finement pulvérisée.

Depuis longtemps on s'est aperçu de la réaction alcaline que prend l'eau au contact des silicates, en particulier les eaux de poudre d'orthose dans la fabrication de la porcelaine. Les analyses montrent que cette alcalinité est due à la libération des bases des silicates, plus spécialement des alcalins.

Mais cette libération reste très faible et on cherche à l'augmenter par l'addition d'acides, le plus souvent l'acide carbonique ; dans ces conditions la minéralisation de l'eau s'accroît effectivement avec la concentration de l'acide, et il se produit un trouble colloïdal. Résumons très succinctement les résultats de l'ensemble de ces travaux : l'analyse des solutions décèle la présence de K, Na, Ca, Mg et d'un peu de Si et la partie insoluble est riche en Si, Al et éventuellement Fe ; les concentrations et les proportions relatives de ces éléments dépendent des conditions opératoires souvent incomplètement indiquées, et de la nature des silicates traités. C'est ainsi que la biotite est déjà trouvée plus vulnérable que les feldspaths et la muscovite.

Pour fixer les idées on a préféré donner plus de détails sur les résultats obtenus récemment par D. CHATONIER (1957) sur des granites ou des basaltes dans des conditions expérimentales bien précisées.

L'auteur opère sur la poudre de roche à température ambiante, soit par macération dans un agitateur mécanique, soit par lixiviation dans une allonge munie d'un tampon de coton ; il détermine la résistivité, la silice et les quatre bases dans les solutions ainsi obtenues.

L'étude des conditions opératoires le conduit aux conclusions suivantes : par macération, l'augmentation du temps de contact, de la concentration en CO^2, du degré de finesse de la poudre et du rapport poudre solvant, élève la minéralisation ; par lixiviation la minéralisation croît également avec la teneur en CO^2 (la fixation d'un temps de contact est impossible, le temps de passage d'une même quantité de liquide dépend du tassement de la poudre et de la formation de substances peu perméables) ; ces conditions peuvent aussi modifier les proportions relatives des éléments dissous ; les deux méthodes appliquées dans les mêmes conditions conduisent à des résultats comparables.

Par lixiviations successives des mêmes échantillons de granite, on obtient des solutions de moins en moins minéralisées, mais les rapports des éléments varient peu, sauf $Na + K/Ca + Mg$ qui diminue.

Au tableau 7 sont présentés quelques résultats d'analyses obtenus par lixiviation sur des roches granitiques et volcaniques dans les conditions suivantes : CO^2 : 100 mg. litre, finesse de la poudre : tamis 100, 50 g de poudre pour 500 cm³ de solvant. L'examen de ces chiffres permet les remarques suivantes : comme pour les eaux naturelles les rapports Na/K sont plus élevés pour les eaux volcaniques que pour les eaux granitiques ; la composition des eaux de lixiviation est beaucoup plus éloignée que celle des eaux naturelles pour les granites que pour les roches volcaniques, tant par la minéralisation que par la valeur du rapport Na/K.

D'après les travaux précédents, on a vu que l'action de l'eau sur les silicates est considérablement accrue par la présence du CO^2 et des autres acides. E. R. GRAHAM (1941), dans une étude sur l'altération de l'anorthite, montre que les acides humiques, s'ils ne sont pas saturés, sont aussi des agents actifs de la décomposition des silicates.

Dès 1857, A. DAUBRÉE avait constaté que les limons qui se forment par frottement réciproques des roches dans les eaux courantes n'ont pas la même composition que les matériaux initiaux. Afin d'étudier expérimentalement ce phénomène (1867), il introduit 3 kg de fragments d'orthose avec 5 litres d'eau distillée dans un cylindre rotatif en fer qui fonctionne pendant 192 heures, soit un parcours de 460 km. Il obtint 2,72 kg de limon dont 36 g de subtances « argileuses » tandis que 12,6 g de potasse (soit 2 à 3 p. 100 de la potasse des limons), 0,03 d'alumine et 0,02 de silice passent en solution. Ayant remarqué que l'eau devient à peine alcaline sur une poudre impalpable préparée à sec, l'auteur en déduit que la décomposition n'atteint cette importance que si l'action mécanique et l'action dissolvante de l'eau s'exercent simultanément. Enfin il montre l'intensification de l'attaque en présence de CO_2.

C'est à cette place qu'il faut mentionner les observations intéressantes de A. S. CUSHMANN et P. HUBBARD (1905) (cités par E. BLANCK (1929). L'eau en contact avec de la poudre d'orthose met immédiatement en liberté de l'alcali dont la libération cesse peu à peu. Si on ajoute un électrolyte comme le chlorure d'ammonium, il passe considérablement plus d'alcali en solution. D'autre part le bleu de méthylène permet de déceler à la surface des particules de minéral une mince pellicule colloïdale.

Pour démontrer la provenance des argiles glaciaires par décomposition chimique des aluminosilicates lors de leur broyage par les glaciers en présence d'eau et de CO_2, O. TAMM (1925) reprend les expériences de A. DAUBREE en flacons de quartz et à température plus basse. En opérant sur du granite, l'auteur obtient aussi une libération de bases et une formation de substances, qui, dans certaines conditions, présentent une composition voisine des argiles glaciaires.

Plus tard (1929) il substitue au frottement les méthodes de broyage employées pour l'obtention des substances colloïdales à partir de corps durs. En traitant ainsi des feldspaths au sein d'une quantité d'eau *non renouvelée*, celle-ci devientalcaline jusqu'à pH 10,7 pour le microcline et 11,1 pour l'oligoclase et la matière s'hydrate d'autant plus que son état de division est plus poussé. En présence d'acides, ceux-ci sont neutralisés jusqu'au pH limite.

Quand le pH est compris entre 10 et 6, il s'agit d'un échange de bases réversibles pour le microcline, tandis que l'oligoclase est décomposé irréversiblement. Quand le pH est compris entre 6 et 3 la décomposition est plus intense avec libération non seulement de bases, mais aussi d'aluminium.

Enfin tandis que les particules minérales comprises entre 0,2 et 0,5 μ réagissent rapidement, dès qu'elles atteignent des dimensions supérieures à 2 μ, elles ne sont plus sensiblement attaquées.

C. W. CORRENS (1951) (voir aussi M. D. C. SANCHEZ-CALVO), constatant d'une part la lente et faible action de l'eau sur les silicates à la température ambiante et d'autre part l'efficacité des actions mécaniques sous l'eau, a reproché à la plupart de ces essais le non renouvellement des solutions en contact comme ne correspondant pas aux conditions naturelles.

Dès 1939 il entreprend l'étude de la décomposition des silicates sur des poudres de minéraux traités par des solutions *constamment renouvelées*. Les minéraux sont broyés à sec dans un moulin à billes d'agathe et les poudres obtenues calibrées par tamisage au sein du méthanol ($< 10\ \mu$ et $1\ \mu$). Dans les premières expériences le

renouvellement continu de l'eau était assuré par dialyse (ou électrodialyse) et distillation du dialysat. Dans ces conditions l'auteur obtient par exemple le passage en solution de 12 p. 100 de la potasse d'un feldspath en 43 jours.

Mais l'essentiel des essais de l'auteur est réalisé dans des ultrafiltres au-dessus desquels la solution est agitée constamment ; des solutions variées sont employées : eau pure ou eau additionnée de CO_2, d'acides minéraux et de sel pour tamponner à un pH déterminé ; des minéraux de structures différentes sont traités ; les filtrats sont analysés dans le temps. Voici l'essentiel des résultats obtenus :

Les minéraux de structure simple comme l'olivine se dissolvent à la manière de NaCl.

La décomposition de minéraux à structure tridimensionnelle comme les feldspaths potassiques et la leucite est beaucoup plus lente ; K passe d'abord beaucoup plus vite que Si et Al, mais à partir d'un certain volume de filtration la libération des éléments devient régulière et s'effectue dans les *proportions existant dans le minéral.* C'est qu'au début de l'opération il se forme une pellicule, puisque par broyage sous l'eau on n'observe pas cette singularité. Cette pellicule présente une composition variable, et la présence de substances argileuses n'a pu être mise en évidence par les rayons X.

Enfin pour les minéraux à structure lamellaire comme la muscovite, on ne constate qu'une tendance à une désagrégation uniforme ; dans ce cas il se forme une couche résiduelle de micas moins potassiques.

En outre CORRENS étudie l'influence de différents facteurs sur ces phénomènes. L'intensité de la décomposition passe par un minimum vers la neutralité, ainsi d'ailleurs que le rapport SiO_2/Al_2O_3 de la pellicule (pour les feldspaths potassiques ce pH minimum est 6,6 et le rapport SiO_2/Al_2O_3 de la pellicule reste toujours très supérieur à 2) ; elle croît avec la température (sans influencer les rapports des éléments libérés) et la finesse des particules.

E. R. GRAHAM (1950) par broyage dans l'eau, vérifie l'ordre de stabilité des feldspaths établi par S. A. GOLDICH (1938). L'altérabilité croît avec la richesse en Ca et l'albite est très résistante.

Par percolation lente d'eau distillée à travers du granite finement broyé G. MILLOT (1949) obtient le trouble des feldspaths potassiques et la séricitisation des plagioclases.

V. E. NASH et C. E. MARSHALL (1957) étudiant les phénomènes d'échange à la surface des feldspaths montrent que les énergies de liaison des éléments alcalins varient largement avec la composition des réseaux et que les capacités d'échange apparentes se modifient sensiblement avec la nature des ions utilisés. Ils en concluent que la pellicule superficilelle doit être de l'ordre d'une ou deux mailles réticulaires.

J. Van KEYMEULEN et W. DEKEYSER (1953) réalisent des expériences d'altération sur des micas non pulvérisés. Ils ont d'abord constaté que la muscovite et la biotite traitées par un volume fini ou infini d'eau distillée de 80 à 120° ne subit qu'un effeuillement, plus intense pour la biotite, même en présence d'électrolyte, mais sans aucune trace d'altération chimique.

Au contraire, en présence de CO_2 et H_2S à la température ambiante on constate un passage en solution de Si, Al et Fe. Les muscovites sont plus résistantes que les biotites.

M. M. MORTLAND, K. LAWTON et G. UEHARA (1956), en cultivant du blé dans du sable quartzeux mélangé à de la biotite comme seule source de potasse, observent une tranformation de ce mica en vermiculite. Dans les produits intermédiaires, les auteurs ne constatent pas de couche d'hydro-mica, mais un développement de quelques couches amorphes aux rayons X.

Il reste à examiner les essais où la formation d'argile par l'altération artificielle des alumino-silicates a pu être reconnue sans ambiguïté par les méthodes modernes.

F. A. BANNISTER (1951) cite divers auteurs ayant réussi la formation de phyllites de constitution voisine des kaolinites, des montmorillonites et des micas par traitement à l'eau de différents minéraux à haute pression et température (généralement 250 à 350 °) en présence de CO_2 et de divers ions.

On s'est étendu plus longuement sur des essais entrepris plus ou moins récemment en France, car il s'agit de traitements plus voisins de l'action des agents naturels portant non plus sur des poudres, mais sur des matériaux grossièrement concassés, ou même des échantillons assez importants. Aussi ces méthodes étudient simultanément les phénomènes de désagrégation et d'altération chimique et leur interaction ; les effets sur la désagrégation seront surtout décrits dans un des chapitres suivants.

En 1930, A. DEMOLON et E. BASTISSE (1936-46) abandonnent en case lysimétrique 800 kg de granite concassé en fragments de 2 à 4 mm. Il s'agissait d'un granite porphyroïde présentant la constitution minéralogique suivante : quartz 50, orthose 51, albite 16,5, anorthite 8,0 et biotite 5,5 p. 100.

Les eaux de drainages sont analysées jusqu'en 1945, année où sont effectuées l'analyse granulométrique du matériel altéré et l'analyse chimique de chacune des fractions obtenues. L'essentiel des résultats a été reproduit au tableau 8.

On voit que sous la seule influence des facteurs climatiques, il y a eu désagrégation du granite et formation en 15 ans de 1,45 p. 100 de colloïdes.

Des fractions grossières aux plus fines on constate une diminution de Si, une augmentation d'Al, Fe, Mg, légère pour K, considérable pour H^2O, tandis que Ca et Na passent par un maximum pour la fraction 2-20 μ (très légèrement pour Ca).

Cette variation de composition indique que ce sont surtout les plagioclases et les biotites qui passent dans les fractions fines. Dans les colloïdes, près de la moitié fer est à l'état de limonite ; S. HENIN (1947) y reconnaît la présence d'illite.

L'élimination des bases par les eaux de drainage s'effectue lentement et régulièrement dans l'ordre décroissant :

$$Ca > Mg > K \text{ (Na n'a pas été dosé),}$$

si l'on rapporte les quantités drainées aux quantités initiales. Ces cations sont éliminés sous forme de nitrates et de sulfates, les nitrates peuvent provenir des eaux atmosphériques et de l'activité microbienne, les sulfates du soufre du granite (0,62 p. 100). Le pH des eaux est compris entre 6,85 et 7,8.

P. BIROT (1947 et 1950) désirant étudier le mécanisme de l'altération des roches cristallines sous climats subarides et tropicaux, eut l'idée de faire intervenir un nouveau facteur : les alternances brusques de température et d'humectation. L'auteur fait agir de l'eau de pluie sur des échantillons (de l'ordre de 20 g) de roches grenues

TABLEAU 8

Expériences A. DEMOLON *et* E. BASTISSE.

	% de matière sèche					
	Granite initial	Granite altéré				
		Fractions grossières			Colloïdales	
		> 200 μ	de 20 à 200 μ	de 2 à 20 μ	de 0,75 à 2 μ	< 0,75 μ
Analyse granulométrique	—	64,75	29,50	3,85	1,00	0,45
SiO_2	74,74	75,80	73,50	67,50	61,40	53,80
Al_2O_3	13,50	14,23	15,29	18,29	20,81	22,43
Fe^1O^1 combiné	1,50	1,57	1,96	2,86	2,62	3,59
Fe_2O_3 libre	—	—	—	—	1,67	2,98
CaO	0,93	1,27	1,32	1,39	1,33	1,32
MgO	0,59	0,58	0,75	0,89	1,35	1,84
K_2O	4,63	4,77	4,90	5,06	5,16	5,34
Na_2O	1,86	1,80	1,85	2,48	0,90	0,30
P_2O_5	0,25	—	—	—	—	—
H_2O	0,90	0,72	0,87	2,50	4,65	7,52
Rapports moléculaires SiO_2/R_2O_3 combinés	8,78	8,44	7,53	6,42	4,64	3,69

Eléments éliminés par les eaux de drainage
Volume d'eau écoulé : 4 376 lit.9

	Total en g	% quantité initiale	Concentration moyenne mg/l
SiO_2	37,6	0,02 (2)	8,6
CaO	276,5	3,71	63,2
MgO	42,5	0,94	9,7
K_2O	59,2	0,16	13,5
P_2O_5	3,0	0,15	0,69
S. des sulfates (1)	50,3	—	11,4
N. des nitrates	27,6	—	6,3

(1) Apports atmosphériques déduits.
(2) Quartz déduit.

ou de leurs principaux minéraux pendant 5 à 7 mois ; les plus hautes températures correspondent aux maxima de ces climats. Voici l'essentiel des résultats :

L'immersion dans l'eau à la température ordinaire (environ 20°) suivie ou non de dessiccation, ne produit que des *effets insignifiants*.

Par immersion permanente dans l'eau à 50°, il se forme un précipité, mais les échantillons ne changent pas de poids, l'hydratation compensant la perte de substance.

Par alternance (12 h.) d'immersion dans l'eau à température ordinaire et dessiccation à 75°, les feldspaths ne subissent pas d'altération chimique sensible ; cependant on observe des taches de rouille autour des biotites même en profondeur, les lamelles sont gonflées et éclatées, mais les propriétés optiques sont conservées.

Les alternances d'immersion et de dessiccation à la même température (70°) conduisent à la formation de croûte de carbonate de fer et d'efflorescences salines.

Ces essais furent poursuivis avec S. CAILLERE et S. HENIN (1952, 1954 et 1955) par l'emploi de solutions d'électrolytes : sels, acides ou alcalis avec ou non alternance hebdomadaire de pH, toujours combinée avec une alternance d'immersion à la température ordinaire et de dessiccation à 70°.

Les auteurs obtiennent ainsi la formation de phyllites dans certains cas : une argile de type saponite par l'action d'une solution de sulfate de soude sur un gabbro et une montmorillonite par le traitement d'un gabbro et d'un granite par une solution d'acide acétique à pH 5.

Les facteurs les plus actifs sont l'alternance d'humectation et de dessiccation et la concentration des produits d'altération quand les solutions ne sont pas renouvelées. Il n'a jamais été constaté de formation d'argiles à partir des minéraux isolés soumis aux mêmes traitements.

Enfin A. OBERLIN, S. HENIN et G. PEDRO (1958) inaugurent une autre méthode expérimentale d'attaque par lessivage, toujours de fragments de roches, par l'eau distillée à 70° au moyen d'un Soxlet pendant plusieurs mois. Ces essais furent poursuivis par G. PEDRO (1958 à 1960).

Sur un granite l'opération conduit à la libération des bases et de la silice et la formation de produits fins. L'examen de ceux-ci au microscope électronique montre qu'il s'agit de monocristaux de feldspaths et de micas de taille globulaire (hydroxydes).

Pour un basalte, on a aussi libération de silice et d'alumine dont une partie reste sur place, tandis que le fer reste en totalité dans la croûte qui se forme à la surface de la roche.

En aucun cas on n'assiste à la naissance de phyllite, sauf en présence de CO_2 permettant la formation de montmorillonite, le rapport silice/cations en solution étant beaucoup plus faible qu'avec l'eau pure.

2. — SYNTHÈSE ET TRANSFORMATION DES ARGILES.

Les premières réussites de synthèse ont été obtenues sous pression à haute température (200°-400°) dans une bombe ; F. A. BANNISTER (1951) donne un aperçu des principaux de ces travaux, (1932-1941).

Ce traitement agit soit sur un gel artificiel de silice et d'alumine en présence ou non d'alcalis, soit sur des minéraux naturels en présence de CO_2, d'HCl et d'ions divers. Ces auteurs obtiennent ainsi la synthèse d'argiles des trois principaux types · kaolinites, montmorillonites et micas. Comme le fait remarquer S. HENIN (1947) la nature de l'argile formée dépend plus du pH et des ions présents que du

rapport de la silice à l'alumine et il donne le tableau suivant des conditions de formation :

Réaction acide	Réaction alcaline	
Kaolinite	Montmorillonite	Mg
	Zéolithe	Na
Muscovite	Séricite	K

A température et pression normales les succès de synthèse par vieillissement de gels alumino-siliciques ont été rares. S. HENIN et O. ROBICHET (1953) n'obtiennent aucun résultat ni par digestion à 100°, ni par l'alternative de dessiccation et d'humectation. Signalons seulement l'obtention par M. BIRDSALL (1951) d'un minéral à 8,13 A par vieillissement à l'acétone et par S. HENIN (1957) de divers types phylliteux par contact de certains électrolytes.

Par contre les résultats positifs sont beaucoup plus nombreux lorsqu'on opère sur des solutions vraies. Par électrolyse d'une solution de silicate ou d'aluminate de potassium avec des cathodes de magnésium ou d'aluminium, S. CAILLÈRE et S. HENIN (1947-1948) préparent diverses substances bien cristallisées : antigorite, böhmite, mais pas la kaolinite.

Si, en précipitant les solutions de silicate par diverses solutions salines, on obtient des produits amorphes, S. HENIN et O. ROBICHET (1953, 1954, 1955) en opérant à des concentrations voisines des eaux naturelles et à l'ébullition, réussissent un certain nombre de synthèses d'argiles : montmorrillonite, antigorite, bohmite, mais la formation de la kaolinite reste incertaine ; la silice peut être empruntée aux silicates solides ; la nature des produits formés dépend plus du pH et de la nature des électrolytes que de la proportion des constituants.

S. CAILLÈRE, S. HENIN et J. ESQUEYIN (1955) montrent que la vitesse de réaction est fonction de la température suivant la loi d'ARRHÉNIUS, et que par conséquent les résultats obtenus précédemment pourraient être extrapolés à la température ordinaire ; en effet la montmorillonite a pu être formée à 20° ; d'après cette loi ils calculent que les vitesses de réactions varient dans les rapports de 1 à 10 ou 15 pour les températures correspondant aux climats extrêmes de notre globe terrestre.

D'autre part des transformations d'argiles ont pu également être réalisées expérimentalement.

Citons J. W. GRUNER (1939) qui transforme la vermiculite en une substance analogue au mica dans une bombe à haute température en présence de divers sels et S. CAILLÈRE, S. HENIN et S. MERIAUX (1947-48-49) qui peuvent réaliser en présence de divers ions à la température ordinaire, mais surtout à l'ébullition, le passage d'une part de la montmorillonite en phyllite du type kaolinique, vermiculite-chlorite ou illite et d'autre part l'apparition de vermiculite à partir de phyllite du type mica. La nature et la concentration des cations jouent encore ici un rôle important sur la nature des minéraux formés.

3. — DÉSAGRÉGATION DES ROCHES GRANITIQUES.

Dans les expériences de A. DEMOLON et E. BASTISSE (1946) on voit (tableau 8) que les actions météoriques pendant 15 ans sur un granite à biotite concassé à 2-4 mm ont donné 35 p. 100 environ de particules de dimension inférieure à 200 μ pour lesquelles la séparation des minéraux est à peu près totale.

Désirant tester l'effet de la *seule* insolation sur la désagrégation des affleurements granitiques sous climats subarides et tropicaux, D. T. GRIGGS (1936) soumet un échantillon de granite à des alternatives d'échauffement et de refroidissement (toutes les 15 minutes, 142 à 32°) *en l'absence d'humidité*. Pour une action de ce traitement que l'auteur estime être équivalente à celle de l'insolation dépassant un millier d'années, aucun changement n'est visible même à l'examen microphotographique.

P. BIROT, puis plus tard S. CAILLÈRE, S. HENIN et G. PEDRO (1947-1959) souhaitant également étudier le mécanisme de la désagrégation des roches cristallines sous ces mêmes climats, entreprirent une série d'essais au laboratoire faisant intervenir en plus des variations thermiques, des variations d'humidité et l'action des sels.

Voici résumé brièvement l'ensemble des résultats obtenus pour des durées d'expérience variant de 2 à 7 mois :

Aucune désagrégation importante n'est obtenue soit par immersion permanente dans l'eau de pluie à la température ordinaire ou à 50°, soit par alternance biquotidienne d'immersion et de dessiccation à la température ordinaire 25° ou à 70-80°.

Par contre la désagréagtion devient nettement sensible quand la dessiccation seulement a lieu à 70-80°, l'immersion s'effectuant dans l'eau à 25°. Il s'agit d'une action superficielle, la limite entre la roche désagrégée et la roche saine restant bien tranchée ; des gros cristaux d'orthose peuvent être affectés. Avec des échantillons polis, il n'est pas obtenu de désagrégation.

Avec des solutions saturées de sels la désagrégation devient beaucoup plus intense. Les sels non hydratés sont les plus efficaces, les sels hygroscopiques restant les moins actifs.

Les granulites, pegmatites, granites à grains fins et aplites sont les roches les plus résistantes à l'action de ces agents ; on peut trouver des différences pour une roche de même nature dans un même gisement. Ces différences dépendent de la porosité qui règle la vitesse de pénétration des liquides dans la roche. Cette porosité a pu être mesurée par la profondeur de pénétration d'une solution de bleu de méthylène observée au microscope sur les coupes d'échantillons de roches immergées pendant un même temps dans cette solution. Il a été vérifié que l'alternance d'immersion et de dessiccation à 80° augmente la porosité.

Enfin l'eau oxygénée (110 vol.) à froid provoque la désagrégation rapide et complète du granite à biotite et non de l'andésite de Volvic, alors que ces roches présentent une résistance inverse aux alternances d'humectation et de dessiccation du fait de la plus grande porosité de la lave. Cette action est d'autant plus intense que la teneur en biotite et secondairement la dimension des grains, la régularité de leur dimension relative et la microfissuration sont grandes.

C. — INTERPRÉTATIONS.

1° ALTÉRATION CHIMIQUE DES MINÉRAUX DU GRANITE.

Par suite de son exploitation comme terre à porcelaine, le kaolin dès son origine attire de bonne heure l'attention des chimistes (GUITTARD le premier en France). La situation des gîtes de kaolin dans les massifs de roches feldspathiques (plus particulièrement les filons de pegmatite) et la présence dans cette roche de quartz, de mica et de feldspaths présentant tous les stades d'altération, montre rapidement aux observateurs que l'argile kaolinique est un produit d'altération des feldspaths.

D'autre part l'analyse chimique révèle qu'il s'agit d'un silicate d'alumine hydraté ; on s'aperçoit donc d'abord que le phénomène consiste en un départ d'alcalis (ALLUAU et VAUQUELIN)et de silice (GEHLEN). BERTHIER cherche à l'expliquer par une scission du feldspath en silicate de potasse entraîné par l'eau et silicate d'alumine qui reste. Ces vues sont confirmées un peu plus tard par FORCHAMMER, BRONGNIART (1839) et MALAGUTI (1841).

Quant à la cause du phénomène certains auteurs, s'appuyant d'une part sur l'hétérogénéité pétrographique des gisements de kaolin et d'autre part sur des essais d'électrolyse du kaolin, l'attribuent à des effets « galvaniques » de contact.

M. J. FOURNET (1833) pense qu'on doit renoncer à cette hypothèse car il croît avoir observé le phénomène de kaolinisation en dehors des gîtes de kaolins dans les massifs cristallins en voie d'altération dont les gisements n'offrent aucune hétérogénéité; et si l'action est plus profonde à la jonction de roches de natures différentes, il faut plutôt en chercher la raison dans une plus intense circulation de l'eau dans les fissures.

D'une façon générale, il admet que l'altération des roches cristallines est due à la tendance au dimorphisme de certains de leurs minéraux provoquant leur désagrégation lorsque ceux-ci arrivent dans les zones superficielles de l'écorce terrestre, désagrégation permettant une action chimique de nature très variable suivant les corps en présence et qui peut même être nulle. Il souligne le rôle important que doit jouer l'anhydride carbonique dissous dans l'eau, lequel s'emparant des bases libérerait une partie de la silice qui serait entraînée avec elles grâce à sa solubilité dans les solutions de carbonates, tandis que le silicate d'alumine résiduel resterait à l'emplacement du cristal dont il provient (pseudomorphose). Cette agressivité de l'acide carbonique serait d'autant plus intense que les bases sont fortes, c'est pourquoi les feldspaths alcalins seraient les plus vulnérables.

V. EBELMEN (1845), en comparant les compositions chimiques des parties saines et les parties altérées de divers minéraux silicatés et de roche, constate que le produit final se rapproche de plus en plus d'un silicate d'alumine hydraté, et remarque que les silicates sans alcalis se décomposent aussi facilement que les espèces feldspathiques et quelquefois même avant elles. Il admet avec FOURNET l'importance de l'acide carbonique et ajoute celle des matières organiques.

Enfin un géologue, A. LACROIX, dans son traité de minéralogie (1893-1896) présente aussi la transformation de l'orthose en kaolin comme une *pseudomorphose* qu'il attribue autant aux influences météoriques qu'aux fumerolles fluorées consécutives de la consolidation. Il ajoute en outre que d'autres argiles : halloysite, montmorillonite et « allophanes » peuvent aussi se rencontrer dans les fissures de roches feldspathiques.

La cession d'une petite quantité des bases et de la silice des roches et minéraux silicatés à l'eau montrée par l'analyse des eaux de source des massifs cristallins, par la composition des eaux de broyage des feldspaths dans les fabriques de porcelaine et enfin par de nombreuses expérimentations dont celle de A. DAUBREE (1867) semblait confirmer cette hypothèse.

La kaolinisation apparaissant comme la pseudomorphose la plus importante dans les roches cristallines en voie d'altération, on pouvait donc penser avec FOURNET que dans les sols où l'activité des agents mis en cause est maximum, on ne devait plus retrouver en dehors du quartz que de petites quantités de minéraux non décomposés.

A. DELAGE et H. LAGATU (1904), constatant au contraire que dans la terre arable « les minéraux sont à l'état où on les rencontre dans les roches d'origine, c'est-à-dire à un état de pureté parfaite ou présentant sans accentuation les épigénies (pseudomorphoses) comme dans les roches » en conclurent « *que toutes les actions chimiques dont la terre arable est le siège, sont consécutives à des dissolutions simples et directes de ces minéraux constituants* ».

L. CAYEUX (1905) réfuta cette nouvelle théorie en ces termes : « la présence (dans la terre arable) de matériaux altérés (épigénisés) à des degrés fort divers et en proportion très variable est la règle absolument générale », «il n'y a donc pas lieu de rechercher un autre mode de dissolution des bases ».

Ceci donna l'occasion à DELAGE et LAGATU de préciser leur pensée dans une seconde note dont voici les passages les plus significatifs : « Si donc il y a dans la terre arable des minéraux épigénisés, rien n'autorise à affirmer qu'il y a dans ce milieu tout différent des roches en place, des minéraux en activité épigénique : tout nous porte à penser que les décompositions sont consécutives à la dissolution pure et simple. Des expériences dont on ne tient aucun compte dans les objections qu'on nous a faites, sont probantes pour ce qui concerne la dissolution des feldspaths objet du litige. DAUBREE a montré que l'orthose livre à l'eau pure non seulement sa potasse, mais aussi sa silice et son alumine ; ces deux derniers corps se séparent ensuite à l'état d'hydrates colloïdaux absorbant une partie de la potasse dissoute ».

Ces vues sont confirmées à l'époque par d'autres auteurs, citons F. K. CAMERON et J. M. BELL (1906) et J. DUMONT (1909).

Les premiers observent aussi dans les sols tous les minéraux communs des roches dans le même état de pureté, mais en proportions différentes. Ce fait ne peut se comprendre qu'en admettant que les produits secondaires résultent des recombinaisons et cristallisation des substances formées après solution et hydrolyse de ces minéraux.

Ces mêmes auteurs se représentent pour l'orthose le phénomène ainsi qu'il suit. C'est un sel d'acide faible et de base forte qui par conséquent s'hydrolyse en potasse et et acide alumino-silicique instable, lequel suivant les conditions peut perdre des proportions variables de silice et donner soit de la pyrophyllite, soit de la kaolinite, soit du diaspore. Dans le cas le plus courant de la formation de kaolinite les équations de réaction exprimées avec la notation actuelle sont les suivantes :

(1) $6\ SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot K_2O + 2\ H_2O = 6\ SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O + 2\ KOH$

(2) $6\ SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot H_2O + H_2O = 2\ SiO_2 \cdot Al_2O_3 \cdot 2H_2O + 4\ SiO_2$

En s'appuyant sur de nombreuses expériences, CAMERON et BELL montrent encore que ce sont des réactions d'équilibre, et qui par conséquent peuvent se pour-

suivre à la condition que l'un des produits résultants s'élimine, soit le plus soluble la potasse. Elles sont favorisées par l'élévation de température et la présence de l'acide carbonique. Mais cet acide n'agirait plus par déplacement de la silice comme le pensait FOURNET, mais en favorisant l'élimination des bases par carbonatation.

D'ailleurs cette interprétation peut prêter à confusion aujourd'hui. En effet pour un chimiste de cette époque l'hydrolyse supposait une dissolution préalable du cristal si faible fût-elle. Depuis l'application par les minéralogistes des phénomènes d'échange d'ions aux minéraux cristallisés, l'hydrolyse ne serait plus un argument opposé à la première hypothèse.

D'autre part, dès 1909, un pétrographe J. de LAPPARENT fait remarquer que non seulement de la potasse, mais un supplément d'alumine est indispensable à la séricitisation des plagioclases, ce qui nécessite la dissolution des feldspaths potassiques dans la totalité de leurs éléments, opinion qui est en accord avec les idées émises quelques années auparavant par DELAGE et LAGATU.

Dans ses leçons de Pétrographie (1923) le même auteur précise que normalement, les feldspaths potassiques s'altèrent peu. Le trouble que l'on observe dans les feldspaths en voie d'altération serait dû à des inclusions non cristallines correspondant des points d'hydrolyse, qui joints à l'hydratation des éléments libérés provoqueraient le craquellement du cristal, les fragments résultants paraissant aussi intacts que les cristaux non désagrégés. Aussi l'auteur ne croit pas que ce phénomène corresponde à la kaolinisation. Quant à la transformation en kaolinite des feldspaths potassiques et même de tous les feldspaths, elle paraît être le résultat d'actions *pneumatolitiques ou hydrothermales*. Mais on constate aussi la kaolinisation des feldspaths en même temps que la formation d'hydrates d'alumine sous les climats tropicaux.

Ainsi cet aspect crayeux que prennent certains feldspaths dans les granites altérés correspond non pas à une kaolinisation, comme le pensait FOURNET, mais à un *craquellement* de la matière feldspathique. Ce fait ne fût confirmé que plus tard en France par A. S. MIHARA (1934) pour les granites des Vosges, par H. MALTERRE (1940) et D. COLLIER (1951) pour les granites du Massif Central, G. MILLOT (1949), tout récemment J. DEJOU (1959) pour les granites du Morvan, et par voie expérimentale. A. DEMOLON et E. BASTISSE (1946). Ces auteurs précisent que les plagioclases sont de loin les plus atteints par ce phénomène, qui au point de vue chimique correspond à une hydratation et une perte de Ca et Na ; quant aux microclines, ils ne subissent qu'une dislocation très grossière sans commune mesure avec le phénomène précédent, et sans altération chimique massive ; enfin il ne se forme qu'une petite quantité d'argile qui n'est d'ailleurs pas forcément kaolinique. On peut donc en conclure avec G. MILLOT, que « *la place que le phénomène de kaolinisation prend dans l'enseignement et les connaissances communes, paraît de plus en plus abusive et correspond à une véritable erreur* ».

Par contre la kaolinisation prendrait un développement plus important par l'action de l'eau à température plus élevée. C'est ainsi que dès 1904, C. R. Van HISE (cité par G. W. ROBINSON) proposait la formation des gîtes de kaolin, comme l'a confirmé en France J. NICOLAS (1951-1953) pour des gisements de Bretagne et des expériences de laboratoire telle que celle de G. W. GRUNER (1944). Ce dernier obtient la kaolinite par traitement des feldspaths par l'eau sous pression à 350° en présence d'acide chlorhydrique et d'ions K et Al.

De même la kaolinisation des granites sous les climats tropicaux, qui est cette fois une réalité reconnue depuis longtemps, semble devoir être attribuée à la température plus élevée (jusqu'à 70°) des eaux sous ces climats que sous les climats tempérés, bien que dans ces conditions l'obtention de kaolinite n'ait encore pu être obtenue expérimentalement; cependant G. PEDRO (1960) a réussi la formation de montmorillonite par lessivage de granite à l'eau à 70° en présence de CO_2.

⁂

Deux hypothèses restaient donc en présence quant au processus chimique intime de la *kaolinisation* : celle de FOURNET qui considère le kaolin comme un résidu d'altération des feldspaths et celle de DELAGE et LAGATU d'après laquelle les argiles seraient des produits de néoformation consécutifs de la dissolution des minéraux constituants.

En fait la résolution de ce dilemme n'a pu être efficacement entreprise qu'à partir du moment où les chercheurs eurent à leur disposition les moyens d'analyser la structure cristalline, c'est-à-dire la méthode par diffraction des rayons X et plus récemment le microscope électronique. D'après F. A. BANNISTER (1951) la structure des argiles ne fut pour la première fois étudiée par la première méthode appliquée aux poudres qu'en 1916, et le premier diagramme de kaolinite n'aurait été obtenu qu'en 1923. Ainsi les minéralogistes purent distinguer les argiles par leur état cristallisé, des substances restées amorphes dans les complexes d'altération.

La première hypothèse est reprise par W. VERNADSKY (1924) qui l'étaye sur une théorie nouvelle. Les alumino-silicates qui donnent des argiles kaoliniques par altération, auraient une structure spéciale caractérisée par la présence d'un noyau kaolinique très résistant. La décomposition chimique de ces minéraux se traduirait par la simple élimination des chaînes latérales sans destruction du noyau qui resterait comme résidu. Ce noyau serait un corps endothermique et qui par conséquent ne pourrait pas se former à la température de la surface terrestre. Cette théorie est encore admise par B. B. POLYNOV dans son traité : Le cycle de l'altération (1937).

On retrouve la même hypothèse sous une autre forme dans la théorie de M. L JACKSON (1948 et 1952). Selon cet auteur l'altération argileuse des minéraux se ferait suivant une chaîne de réactions donnant lieu à une série de minéraux d'altération Le sens et la nature de ces réactions et les produits obtenus dépendraient de l'état de division du cristal, des conditions de milieu et du temps. Par l'étude des fractions colloïdales des sols de Chine pris à différentes conditions de milieu et de stades d'altération, JACKSON tente de reconstituer ces chaînes et ces séries pour les silicates feuilletés. Il fait intervenir des réactions de dépotassification, d'hydroxylation, de désalumination et désilicication conduisant à la série complète :

mica → illite → mica intermédiaire → vermiculite → montmorillonite → kaolinite → gibbsite.

G. F. WALKER (1948-1951) rend compte de telles transformations jusqu'à la vermiculite dans un sol d'Aberdeenshire ainsi que G. R. BUTLER (1953) pour les roches de Cornouailles (Angleterre). Dans les sols de Highfield de Pensylvanie et de Chester de Virginie (États-Unis) C. D. JEFFRIES, N. B. ROLLE et G. W. KUNZE (1953) présentent une série d'altérations voisine dans laquelle entre la chlorite.

Quant à M. FIELDES et L. D. SWINDALE (1954) ils établissent un véritable tableau de filiation conçu d'après l'étude des sols de la Nouvelle Zélande, qui selon les auteurs pourrait être utilisé réciproquement pour la détermination de la nature minéralogique de la roche mère et du stade d'altération. Il faut signaler que, dans ce tableau, seuls les micas ne passent pas par un stade amorphe.

La réalisation expérimentale de certaines de ces transformations à l'ébullition et même à la température ordinaire par S. CAILLÈRE et S. HENIN (1947-48-49) vient confirmer partiellement cette conception, *mais seulement pour certains silicates feuilletés.*

De son côté la seconde hypothèse fut singulièrement renforcée par un certain nombre de faits et d'arguments nouveaux que voici :

1° Les nouvelles techniques d'identification des argiles ont permis de mettre en évidence dans les arènes granitiques des phyllites de composition chimique et de structure bien différentes de celles de la kaolinite, telles que l'illite et la montmorillonite.

2° La kaolinite elle-même n'a pas la même structure qu'un feldspath. Tandis que la kaolinite est un silicate à tétraèdres associés en feuillets, les feldspaths ont une structure beaucoup plus compliquée à tétraèdres associés en édifices à trois dimensions. Ce qui conduit S. HENIN (1947) « à supposer que les argiles se forment à partir d'éléments provenant d'une dislocation très poussée de la structure du minéral initial ».

Certains pétrographes attirent même l'attention sur la différence des conditions de stabilité des minéraux magmatiques et d'altération. D. S. KORZINSKY (1940) affirme que les inclusions des feldspaths potassiques ne correspondent pas à une altération, mais à un déséquilibre thermodynamique spontané résultant de l'affleurement de la roche. J. de LAPPARENT (1941) dans sa « logique des minéraux du granite » expose que ces minéraux caractérisés par la tétracoordination de l'aluminium trouvent les conditions de leur stabilité dans les zones profondes de l'écorce terrestre où ils se sont formés. Dès que le granite par suite d'action dynamique va se trouver dans les zones superficielles, ses minéraux sont s'altérer et se transformer en d'autres minéraux dont la structure correspondra en tout ou en partie à l'aluminium hexacoordonné stable dans ces nouvelles conditions. Enfin I. D. SEDLETZKY (1941) (cité par GOVOROFF, 1950) réfute l'argument énergétique de VERNADSKY en remarquant qu'il ne tient pas compte de l'énorme quantité d'énergie libérée lors de la cristallisation des gels alumino-siliciques en minéraux argileux.

3° C. W. CORRENS montre la possibilité de décomposition totale de tous les minéraux silicatés dans l'eau à la température ambiante à condition qu'il y ait renouvellement de la solution. Il s'agit en effet d'une réaction d'hydrolyse d'équilibre qui s'arrête rapidement en solution non renouvelée à un pH caractéristique du minéral ainsi que les expériences de O. TAMM l'ont mis en évidence. La vitesse de décomposition passe par un minimum vers la neutralité et croît avec la température et la finesse des particules. Pour certains minéraux comme les feldspaths potassiques, il se forme bien à la surface des particules une pellicule de substance moins riche en bases, mais qui n'est pas une argile, et dont la composition varie d'ailleurs avec le pH de la solution. D'après V. E. NASH et C. E. MARSHALL il s'agit de matière felds-

pathique plus ou moins désorganisée sous une épaisseur très faible et qui fonctionne comme une membrane d'échange entre le minéral et la solution comme l'avaient déjà soupçonné A. S. CUSHMANN et P. HUBBARD dès 1905. Ainsi l'efficacité des actions mécaniques de frottement dans les expériences de A. DAUBREE peut être attribuée autant à la disparition de cette pellicule protectrice au fur et à mesure de sa formation, qu'à l'effet de division de la matière.

On vient de voir que les minéraux silicatés sont d'autant plus attaquables par l'eau qu'ils sont finement divisés. Il convient de rapprocher de ce fait l'action parallèle de l'eau sur la microdivision de certains minéraux du granite jusqu'au stade de dispersion colloïdale et même de monocristal. Elle a été obtenue expérimentalement d'une part par A. DEMOLON et E. BASTISSE par exposition de granite concassé aux influences météoriques, d'autre part par A. OBERLIN, S. HENIN et G. PEDRO par lixiviation également de granite concassé pendant 2 mois, par l'eau à 70°, il est vrai.

4° Ainsi l'hydrolyse libérerait simultanèment d'une part les hydroxydes des bases alcalines et alcalino-terreuses solubles dans l'eau,d'autre part l'acide silicique et les hydroxydes d'aluminium et de fer qui peuvent former des solutions colloïdales de signes contraires. Ainsi que le suggère déjà J. M. Van BEMMELEN en 1888 (cité par G. W. ROBINSON), la floculation mutuelle de ces sols dans ces conditions peut donner des composés d'absorption amorphes dont la composition indéfinie dépend des conditions de milieu, comme le montre expérimentalement S. MATTSON (1931) et A. DEMOLON et E. BASTISSE (1934). De nombreux auteurs proposent que les argiles proviendraient de la cristallisation progressive de ces gels. C. H. EDELMAN et A. C. SCHUFFELEN (1947), constatant une analogie de composition entre ces derniers et les argiles pour des mêmes conditions de formation, en déduisent que les possibilité de cristallisation seraient les plus favorables au voisinage du point isoélectrique.

En fait si la synthèse des principaux types d'argiles, dont la kaolinite, à partir de tels gels de silice et d'alumine, a pu être obtenue à pression et température élevées, ces réussites sont beaucoup plus rares à pression et température normales. W. NOLL (1935) (cité par J. Van SCHNYLENBORGH et A. M. H. SANGER, 1950) en concluait que dans la nature ce phénomène devait se produire dans des conditions épigéniques. Par contre, S. HENIN et O. ROBICHET sont plus heureux en travaillant avec des solutions ioniques, à condition d'opérer à des concentrations voisines des solutions naturelles ; mais la formation de kaolinite est demeurée jusqu'ici incertaine.

5° La nature des argiles dépend beaucoup plus des conditions du milieu de genèse (pH et cations en présence) que de la nature du matériau initial.

Ceci est observé par de nombreux auteurs parmi lesquels nous citerons I. D. SEDLETZKY (1941) et C. H. EDELMAN (1946).

C'est également vrai pour les expériences de synthèse ou les essais d'altération expérimentale des minéraux.

En définitive nous sommes amenés à conclure, comme l'avait déjà fait G. W. ROBINSON (1936), que les deux hypothèses se vérifient dans les conditions naturelles, mais pour des catégories de minéraux différents : les micas pour la première, les feldspaths pour la seconde. Ce qui, à première vue, ne saurait nous étonner, puisque les minéraux d'altération, les argiles appartiennent au même groupe structural que les micas : les silicates feuilletés. Il est curieux de constater que le mode d'altération

des feldspaths qui était à l'origine de la première hypothèse, soit au contraire considéré aujourd'hui comme relevant de la seconde.

D'une façon générale, il apparaît donc que la destruction d'un édifice cristallin par altération serait d'autant plus nécessaire et complète que sa structure serait éloignée de celle des phyllites. Il convient de préciser que les phyllites elles-mêmes peuvent être aussi complètement hydrolysées comme l'a montré expérimentalement C. W. CORRENS lorsque les eaux de lixiviation sont suffisamment renouvelées. Dans ces conditions tandis que les silicates à structure simple comme l'olivine se dissolvent à la manière du chlorure de sodium ; que les silicates à structure tridimensionnelle comme les feldspaths forment une pellicule superficielle très mince de matières désorganisées de composition indéfinie qu'on peut rapprocher des produits de dislocation réticulaire de G. PEDRO (1960), les silicates à structure feuilletée comme les micas donnent une couche résiduelle plus importante de minéraux à structure voisine appauvris en bases.

Le mécanisme intime de l'hydrolyse est encore mal connu. A. F. FREDERICKSON (1951) suppose que l'eau pénétrant dans le réseau cristallin serait à un haut degré d'organisation assimilable à l'état solide. Par interdiffusion entre les deux phases solides, il y aurait échange des ions H^+ de l'eau retenus plus énergiquement à cause de leur charge électrique pour leur petite dimension avec les ions basiques du cristal qui seraient rejetés pour conserver la neutralité électrique du système. Mais cette substitution, tendant à dilater le cristal et à augmenter sa réactivité chimique, favoriserait sa destruction.

Pour expliquer le craquellement de la matière feldspathique sous l'influence de l'eau, J. de LAPPARENT (1923) proposait déjà la naissance de centres d'hydrolyse et d'autre part O. TAMM et C. W. CORRENS ont montré expérimentalement que la microdivision de la matière favorisait l'hydrolyse (action de surface). Ainsi a-t-on là une sorte de réaction en chaîne dont l'amorçage serait bien une hydrolyse, mais dont la conséquence première est davantage physique que chimique.

On a déjà attiré l'attention sur la grande différence de comportement des feldspaths à l'altération. En premier lieu, la séricitisation ne s'observe que chez les plagioclases. D'après J. de LAPPARENT (1909) cette pseudomorphose se produirait seulement lorsque la circulation de l'eau est très lente ; sa formation nécessite l'apport extérieur du potassium et de l'aluminium provenant des feldspaths potassiques ou des biotites. G. MILLOT (1949) pense que l'ion Ca divalent et floculant serait cause que ce phénomène se déclancherait de préférence chez les feldspaths calciques.

En second lieu les plagioclases sont beaucoup plus sujets à la micro-division que les feldspaths potassiques. On ne peut croire qu'il faille attribuer cette différence à la séricitisation, car des minéraux très séricitisés ne sont pas forcément micro-divisés ; et la micro-division ne correspond pas toujours à un accroissement de la séricitisation. Il s'agit plutôt d'une plus grande sensibilité à l'hydrolyse qui serait due d'après A. RONDEAU (1956) à la substitution des ions OH^- aux O^{--} plus facile dans les feldspaths calciques que dans les feldspaths alcalins, à cause de la présence d'un plus grand nombre de tétraèdres d'alumine (AlO_4) dans ces minéraux ($Al/Si = 1$ dans l'anorthite et $Al/Si = 1/3$ dans le microcline). Certaines observations nous ont conduit à penser que l'aptitude à la micro-division n'est pas si tranchée entre les deux séries de feldspaths, elle doit croître progressivement des microclines à l'albite, puis dans la série des plagioclases de l'albite à l'anorthite.

Quant à la vitesse d'hydrolyse, elle est fonction de la température, de la nature du milieu rocheux et de la vitesse d'élimination des ions libérés par la réaction, soit par renouvellement de l'eau, soit par précipitation. La nature des produits d'altération obtenus dépend des conditions de milieu ainsi créées. On comprend le rôle important que jouent l'intensité du lessivage et la microporosité de la roche. Ainsi par intensité croissante de lessivage dans les granites on a soit de la séricite, soit de la montmorillonite, soit de la kaolinite.

L'action du facteur température est aussi capitale. La vitesse d'hydrolyse s'accroissant avec la température, la libération des bases par rapport au microlessivage est telle que le pH du milieu s'accroît, permettant un entraînement préférentiel de la silice et conséquemment l'individualisation des hydroxydes d'alumine amorphes ou cristallisés sous forme de gibbsite, caractérisant l'altération que HARRASSOVITZ a qualifiée d'allitique, par opposition à l'altération siallitique dans laquelle il n'y a pas libération d'alumine libre.

2. — DÉSAGRÉGATION DU GRANITE : FORMATION DE L'ARÈNE.

Depuis FOURNET (1833) la désagrégation des granites a été attribuée à la kaolinisation des feldspaths. Comme il a déjà été indiqué, ce n'est qu'au début du XX^e^ siècle que la réalité de ce phénomène est mise en doute par A. DELAGE et H. LAGATU (1905) et J. de LAPPARENT (1909).

Dans ses « Leçons de Pétrographie » (1923) ce dernier indique que l'arénisation résulte des tension provoquées par un début d'hydrolyse des feldspaths, conduisant à un craquellement des minéraux et non à leur kaolinisation, et de la décomposition des micas sur leurs bords.

Certains auteurs déjà cités confirment ces données et précisent que ce sont davantage les plagioclases que les feldspaths potassiques qui sont touchés par cette microdivision.

D'autres causes sont proposées parmi lesquelles on ne retiendra que celles suceptibles de se manifester en climats tempérés. F. RUELLAN (1931) au Japon et P. BIROT (1950) signalent le rôle désagrégeant des biotites par gonflement par l'eau ; P. BIROT (1950) cite la théorie de BLACKWELDER d'élargissement des microfissures par gonflement des colloïdes hydratés provenant de l'altération des feldspaths. Enfin HUMBERT et MARSHALL (1943) cités par M. L. JACKSON et G. O. SHERMAN (1953) mentionnent l'effet mécanique de la croissance des cristaux en prenant comme exemple les bris des cristaux de quartz par les pellicules d'oxyde de fer.

Dans nos régions nous ne pensons pas que la biotite soit indispensable à la désagrégation de la roche ; en effet on peut observer des granulites ou des granites à amphiboles pauvres en biotites parfaitement arénisés, tandis que les arènes montrent sans exception les plagioclases microdivisés.

Par contre on peut observer des aplites, des granulites ou des pegmatites encore cohérentes malgré la présence de plagioclases altérés, montrant que si ce facteur est nécessaire, il n'est pas suffisant. Suivant les cas d'autres facteurs doivent intervenir tels que la proportion des plagioclases qui conditionnent leur degré de jointivité, celle des biotites, la grosseur des grains et la structure de la roche.

D'autre part certains auteurs soulignent l'importance des caractères physiques qui conditionnent les modalités de pénétration de l'eau, tels la porosité et la perméabi-

lité. P. Birot (1951) met en évidence une certaine corrélation entre l'altérabilité et la vitesse de pénétration d'une solution de bleu de méthylène. Dans son « Précis de géomorphologie structurale » (1958) cet auteur présente les facteurs susceptibles d'influencer cette propriété et tente d'expliquer leur action. La porosité diminue avec la finesse du grain et l'homogénéité minéralogique ; les roches à deux temps de consolidation seraient les moins poreuses. La fissuration à l'échelle du cristal due aux tensions subies par le gisement après la mise en place serait un facteur important de la porosité ; elle est appréciée par l'indice de fissuration du quartz déterminé par examen microscopique.

P. Duffaut (1957) considère même la microfissuration comme le facteur principal d'altération des granites à gros grains. Il précise que ces microfissures s'ouvrent par réduction des tensions au voisinage de la surface du sol ou des ouvrages souterrains, ces derniers provoquant de nouveaux champs d'altération. Il signale la rapidité avec laquelle se manifeste l'altération des déblais sortis des tunnels par suite de leur microfissuration résultant de l'action des explosifs. Ces phénomènes peuvent être prévus par les tests d'altérabilité mis au point par les géotechniciens :

L. Capdecome, J. Farrau et M. Orliac (1953) considèrent que les deux facteurs essentiels de l'altérabilité des roches sont :

a) la nature et la proportion des minéraux constituants,

b) la surface spécifique présentée à l'agent liquide corrosif.

Ces facteurs sont mesurés par les pertes pondérales subies dans le temps à la suite de traitements acides par des échantillons de la roche d'une part pulvérisée et d'autre part taillée en forme de cylindre.

De son côté B. Thenoz (1956) a construit des appareils pour mesurer directement la perméabilité et la porosité sur des carottes cylindriques de roche.

Ainsi la désagrégation dépend de facteurs qui conditionnent d'une part l'altérabilité chimique, et d'autre part la pénétrabilité de l'eau. A ce sujet remarquons que souvent les deux groupes de facteurs ajoutent leurs effets, c'est ainsi que par rapport aux roches encaissantes, les roches filonniennes de consolidation tardives, nettement plus résistantes, sont d'une part à grains fins homogènes et non microfissurés, et d'autre part pauvres en minéraux calco-sodiques et ferro-magnésiens.

La puissance de la zone d'altération du gisement, outre les facteurs déjà cités, dépend des facteurs qui commandent la circulation de l'eau : d'une part le nombre et la disposition des diaclases, la perméabilité des terrains sous-jacents et la profondeur du niveau de base de drainage ; d'autre part le climat, la situation topographique et la nature de la végétation qui, réglant avec les précédents la répartition des eaux d'infiltration et de ruissellement conditionnent l'érosion, et enfin le temps d'action de tous ces facteurs. Ainsi dans une station donnée la puissance de l'arène résulte de la compétition des vitesses de la désagrégation et de l'érosion.

On peut se demander si les arènes des pays tempérés se sont formées dans les conditions climatiques actuelles. L'hypothèse d'un fond d'altération latéritique est à éliminer, car ces arènes ne présentent pas les aspects décrits précédemment, ni les rares témoins éogènes que l'on rencontre dans le Massif Central ; de plus elles ne renferment pas d'alumine hydratée. Ceci ne doit pas nous étonner puisque d'une

part on sait que l'érosion a été intense depuis l'Éogène et que d'autre part les climats qui se sont succédés depuis cette époque n'auraient jamais été du type tropical. En effet, d'après M. DERRUAU (1960), les climats du Néogène, sauf pour l'Europe méditerranéenne auraient été du type tempéré chaud se rafraîchissant jusqu'au Quaternaire, caractérisé lui par une alternance de climats froids et tempérés, correspondant aux glaciations et interglaciaires. Par ailleurs, l'âge des arènes est variable suivant l'intensité de l'érosion, les arènes les plus âgées étant en France probablement celles du Limousin et de Bretagne. Il est donc possible que ces dernières se soient formées sous des climats tempérés plus chauds d'autant plus que ces régions sont restées à plus basse altitude que les autres régions granitiques françaises. Quoi qu'il en soit, les observations de P. DUFFAUT sur les déblais de tunnel montrent que l'arénisation est possible sous notre climat actuel.

Quant aux boules, il est classiquement admis que leur formation résulte de l'arrondissement par désagrégation de blocs isolés par le réseau de diaclases. Les granites à boules seraient des granites à gros grains à diaclases orthogonales séparées par une distance convenable.

D'après les observations de P. DUFFAUT (1957) dans le Sidobre et la Margeride cette genèse serait impossible dans de nombreux cas par suite de la rareté des diaclases. Il l'explique par l'existence au sein du gisement de zones arrondies ayant échappé à la microfissuration de l'ensemble et par conséquent plus résistantes à l'altération.

3. — ALTÉRATION BIOLOGIQUE, FORMATION DU SOL.

Bien que faisant toujours l'objet d'un chapitre spécial dans tous les ouvrages classiques traitant de l'altération des roches, le rôle des êtres vivants, pourtant essentiel dans la formation des sols, a été moins étudié que celui des agents physicochimiques. La simple observation d'un profil suffit pour vous convaincre qu'il n'y a de sol que là où le climat et la situation topographique (érosion) ont permis l'installation de la végétation. Il ressort aussi de cette observation que, sauf dans des situations exceptionnelles, les végétaux ont une action beaucoup plus importante que les animaux, dont ils conditionnent d'ailleurs le développement. Les études microbiologiques de ces milieux ont permis aussi de se rendre compte du rôle important joué par les microorganismes.

Dès 1890, A. MUNTZ observe des ferments nitriques à la surface et à l'intérieur des roches de hautes montagnes, « là où aucun autre organisme ne pourrait vivre ».

A. LACROIX (1923) et W. VERNADSKY (1922) (cités par J. DEJOU, 1959) proposent l'action de micro-organismes pour expliquer les phénomènes de latéritisation.

A propos de leur expérience d'altération de granite en cases lysimétriques A. DEMOLON et E. BASTISSE (1936) signalent que les cultures sur silico-gels leur ont montré l'installation très précoce des nitrificateurs dans la masse, mais leur activité est faible puisque les teneurs d'azote nitrique des eaux de drainage sont environ de l'ordre de grandeur de celles des eaux de pluie. Le développement de ces bactéries nécessite en effet la présence des matières organiques azotées. Les corrélations entre l'azote nitrique et le calcium dans les eaux de drainage des sols (E. BASTISSE 1951 ; D. COLLIER et M. ROBELIN, 1959) montrent l'action agressive de cette fermentation.

R. Betremieux (1951) a mis en évidence l'action dissolvante, oxydante ou réductrice selon les cas, des fermentations des matières organiques dans le sol.

Les résidus de toutes ces activités microbiennes : les acides humiques jouent un rôle chimique considérable tant qu'ils ne sont pas saturés (Traités classiques, R. Guillin, 1928 ; E. R. Graham, 1941 ; W. D. Keller et A. F. Frederickson 1952).

Certains tallophytes : algues, mousses et lichens et les plantes supérieures lithophiles s'installent sur les rochers là où la végétation normale ne peut se développer, soit à cause du climat, soit à cause de la situation topographique. Cette végétation provoque une altération superficielle de la roche par action mécanique (phénomène d'écaillement des lichens) ou chimique. Elle joue le rôle de pionnier dans les premiers stades de la formation des sols sur les roches saines mises brusquement à jour soit par l'action de l'homme, soit par suite des phénomènes naturels divers (surtout émissions volcaniques) (B. B. Polynov, 1945).

Les grands végétaux, indispensables, à l'édification d'un sol normal, engendrent aussi des altérations physiques et chimiques. L'action mécanique des racines est spectaculaire. Les « sécrétions acides » des racines mises en évidence par leur action corrosive sur des calcaires ont été signalées depuis longtemps (G. André, 1921). On a montré depuis qu'il n'y avait pas réellement de sécrétions, mais échanges directs d'ions entre les poils absorbants et les miscelles colloïdales du sol. W. D. Keller et A. F. Frederickson (1952) proposent que ces échanges pourraient également avoir lieu avec les minéraux soit directement, soit par intermédiaire de ces miscelles. La transformation de biotite en vermiculite par la croissance des plantes est obtenue expérimentalement par M. M. Mortland, K. Lawton et G. Uehara (1956).

Il ne faut pas oublier qu'avant les cultures des couvertures forestières puissantes ont eu une action radiculaire profonde plus importante qu'aujourd'hui.

Enfin tous ces organismes ont indirectement une action chimique considérable par l'acide carbonique et dans certaines conditions de milieu l'acide sulfhydrique qui résulte de leur activité métabolique, dont l'effet est constaté dans de nombreuses expériences.

En pays tempérés, l'ensemble de ces facteurs biologiques a une action *largement prépondérante* sur l'altération chimique des roches granitiques, comme le montre le saut brusque du taux de la fraction colloïdale de l'arène au sol, encore plus net pour les granites qui ne s'arénisent pas. Cette argilisation se fait surtout aux dépens des feldspaths calciques et des biotites.

Cependant on est surpris de la faible influence de cette altération sur la composition chimique totale du sol par rapport à celle de la roche initiale. On note juste des pertes de Mg, de Na et surtout de Ca compensées par un gain d'eau, cela d'autant plus que la roche est plus basique. Ceci peut s'expliquer par l'importance du taux des minéraux résiduels qui reste de l'ordre de 80 à 90 p. 100 et par les éléments fixés par le complexe d'altération dont certains (Fe, P) peuvent être remontés par la végétation dans les sols non cultivés. Il n'en reste pas moins que l'altération chimique en pays tempérés est faible même dans les sols.

De quelle façon et dans quelle mesure les facteurs biologiques peuvent-ils intervenir dans l'altération profonde du granite et son arénisation ? Manifestement l'action directe n'intéresse que la partie supérieure de l'arène ou le voisinage des fissures. Dans les parties profondes l'intervention ne peut avoir lieu que par le CO_2 et les acides humiques entraînés par les eaux d'infiltration. Or on sait que même dans le cas des sols très acides pouvant disperser leurs acides humiques, ceux-ci floculent au seuil de l'arène moins acide et plus riche en calcium. Les eaux de source contiennent en effet très peu de matières organiques d'ailleurs plus dégradées que les acides humiques, mais des carbonates et un excès de CO_2 (D. CHATONNIER, 1957). Ce serait donc seulement par l'acide carbonique que la végétation pourrait indirectement activer l'altération profonde des granites.

4. — CARACTÉRISTIQUES DES ALTÉRATIONS DES GRANITES DANS D'AUTRES RÉGIONS CLIMATIQUES ET ALTÉRATION DIFFÉRENTIELLE.

Afin de bien dégager les caractéristiques de l'altération en pays tempérés, nous allons examiner rapidement celles des régions climatiques extrêmes.

Dans les pays froids et secs : polaires ou alpins, l'altération physique intense des affleurements non couverts de neige toute l'année est principalement attribuée aux alternatives diurnes de gel de et dégel (P. BOUT, 1953), auxquelles il faut ajouter pour les crêtes de hautes montagnes, les fortes fluctuations de température (W. L. KUBIENA, 1952). L'altération chimique siallitique constatée partout où la végétation a pu s'installer par suite du dégel plus ou moins partiel pendant l'été, n'a été rendue possible que par l'extrême acidité du milieu due à l'accumulation d'humus sous ce climat, à moins comme le propose H. ERHART (1935) que ces sols se soient formés sous des climats plus tempérés. Enfin là où le matériau rocheux est gelé toute l'année ou recouvert en permanence d'une épaisse couche de glace, aucune altération tant physique que chimique n'est possible.

L'altération physique domine aussi dans les pays chauds et secs : désertiques et subtropicaux. Le débit des roches en écailles, la desquamation, serait due aux variations brusques de température entre la nuit et le jour. La désagrégation superficielle des roches grenues a été attribuée par WALTER (cité par H. ERHART, 1935) aux cristallisations de sels dans les microfissures des roches grenues. P. BIROT (1950-51-53) montre qu'il suffit des alternatives de température et d'humidité produites par les chutes de pluies sur les roches surchauffées par le soleil, la présence de sels ne pouvant qu'accroître l'intensité du phénomène. Cette action peut être expliquée par un accroissement de la microfissuration favorisant la pénétration de l'eau et par suite un début de l'altération chimique de certains minéraux. Enfin on sait que l'érosion éolienne joue un rôle important sous ces climats.

Sous ces deux groupes de climats caractérisés par la sécheresse, l'altération est surtout physique et reste superficielle. Par contre, sous les autres climats plus humides, l'altération est davantage chimique et plus profonde. Dans les pays chauds et humides : tropicaux et équatoriaux, le fait que l'altération à tendance allitique se manifeste aussi bien sur des affleurements rocheux qu'en profondeur (LENEUF, 1959) montre que le principal facteur responsable est bien la permanence d'une température relativement élevée. L'intensité de cette altération en profondeur est liée à la pérennité de la présence de l'eau au voisinage du front d'altération grâce à l'abondance des

pluies et à la forte capacité globale de rétention en eau du profil d'altération (G. ROUGERIE, 1960). La végétation joue un rôle secondaire puisqu'elle se développe sur des matériaux déjà altérés au maximum, tandis que l'humus est détruit rapidement dans ces conditions climatiques.

En pays tempérés, l'altération est limitée aux premiers stades précédents, aboutissant à la désagrégation de la roche et de certains de ces minéraux, mais accompagnée d'une faible altération chimique du type siallitique. Ces faits impliquent qu'il s'agit d'une hydrolyse acide et moins intense qu'on peut attribuer à la température plus basse des eaux d'infiltration. Par contre dans les sols l'altération chimique est beaucoup plus poussée que dans l'arène, par suite de l'accroissement d'acidité dû aux facteurs biologiques, dont l'humus, qui peut s'accumuler sous ces climats.

Ainsi les différences d'intensité et de nature de l'altération chimique dépendent fondamentalement des facteurs eau et température agissant directement ou par l'intermédiaire de la végétation qu'ils permettent.

* * *

On a comparé précédemment les différences de résistance à la désagrégation de divers granites sous le même climat tempéré. Pour bien souligner, les particularités d'altérabilité des granites facilement pénétrables à l'eau, riches en quartz et en minéraux potassiques, on les comparera avec les laves basiques, qui leur sont opposées par leur structure microlithique ou vitreuse peu pénétrable à l'eau et leur composition minéralogique caractérisée par leur richesse en minéraux calciques et ferro-magnésiens.

P. BIROT (1958) insiste sur la compétition entre la vitesse de pénétration de l'eau dans une roche et la vitesse d'altération chimique de ses minéraux. Tandis qu'en pays tempérés les laves basiques sont beaucoup plus résistantes que les granites, l'inverse est observé dans les pays chauds et humides. Sous ces derniers climats la vitesse d'altération chimique des laves basiques est plus rapide que celle des granites ; cela explique aussi la réduction de la zone d'argile tachetée pour les roches basiques, si développée pour les granites. En climat tempéré au contraire, la plus grande pénétrabilité de l'eau dans les granites explique leur plus grande vulnérabilité relativement aux laves basiques.

Ce même auteur cite aussi (1949), d'après J. CORBELL (1959), l'exemple des granites en creux par rapport aux calcaires dans les pays subtropicaux, sans doute parce que la désagrégation des premiers sous l'influence des alternatives de température et d'humidité est plus efficace que la dissolution des seconds.

Ainsi les particularités du comportement des granites sous l'action des agents atmosphériques sont leur pénétrabilité à l'eau, et leur facilité d'arénisation par suite de leur structure grenue et la présence des feldspaths plagioclases et des biotites, mais aussi leur résistance à l'altération chimique du fait de leur richesse en quartz en en feldspaths potassiques.

D. — APPLICATIONS AGRONOMIQUES.

Les éléments minéraux contenus dans les récoltes obtenues sans fumure minérale proviennent nécessairement des roches. Cette étude a présenté les processus d'altération par lesquels les minéraux des roches cèdent soit indirectement, soit même

directement leurs éléments aux plantes. Des expériences culturales de très longue durée comme celles de Rothamsted ou de Grignon, montrent que les rendements obtenus sans engrais ne sont pas nuls, et qu'il existe bien par conséquent une richesse chimique naturelle des sols.

Fertilité chimique naturelle des sols.

La première question que l'on peut se poser à ce sujet, est l'importance de la variation de cette fertilité chimique naturelle suivant l'origine pétrographique des sols. C'est un problème auquel on attachait plus d'importance autrefois qu'aujourd'hui, l'emploi des engrais minéraux étant encore peu répandu. Dans son traité de Géologie agricole, RISLER (1898) signale déjà la pauvreté des sols sur schistes et micaschistes, par rapport aux sols granitiques, parmi lesquels il distingue comme les meilleurs, les sols à feldspaths calciques.

On s'est également intéressé très tôt aux minéraux qui cédaient le plus facilement leurs éléments. Parallèlement à la théorie de la kaolinisation des feldspaths potassiques, on a crû longtemps que ces minéraux étaient les grands réservoirs de potasse des sols cristallins. Cependant D. N. PRIANICHNIKOFF (1940), dès 1901, indique que si les feldspaths potassiques ne donnent aucun excédent de rendement, il n'en est pas de même d'autres minéraux potassiques tels que la muscovite, la biotite et surtout la néphéline capable de neutraliser les sols tourbeux.

BIELER-CHATELAIN (1910) pense aussi que c'est grâce aux micas blancs, dont les alluvions du Rhône en Valais contiennent 15 à 20 p. 100, que les engrais potassiques ne rendent pas, malgré une teneur en potasse soluble dans l'eau carbonique ou bouillante, inférieure à la dose généralement admise pour limite ; dans une expérience sur sable le Ray-grass est capable d'absorber cette potasse bien qu'elle soit insoluble dans l'eau.

Bien des auteurs attribuent encore aux feldspaths potassiques la richesse naturelle en potasse des sols granitiques. T. B. HUTCHESON (1959) cite E. DETURK (1919) et D. E. HALEY (1923) et observe lui-même que le Tabac croît plus abondamment et absorbe plus de potasse dans du matériel granitique ou feldspathique que dans d'autres milieux privés de potasse.

Il est curieux qu'on ait généralement moins insisté sur le rôle des biotites et des feldspaths calciques, lesquels étant les plus altérables doivent céder plus rapidement leurs éléments, d'ailleurs de nature plus variée.

SWANBACK (1950) vérifie que le granite broyé libère de la potasse au Neubauer et souligne que ces roches contiennent d'autres éléments : Ca et Mg et de nombreux oligo-éléments.

Dans les sols sableux du Missouri (Etats-Unis) R. H. HAWKINS et E. R. GRAHAM (1950) constatent que le degré de fertilité varie en sens inverse de celui de l'altération des minéraux dans le sol. La fertilité est d'autant plus grande que le taux de quartz est bas, les taux des feldspaths élevés et le rapport Na /Ca faible.

M. L. JACKSON et G. D. SHERMAN (1953) confirment que la fertilité naturelle des sols est en liaison avec les minéraux qu'ils renferment ; elle passerait par un minimum au cours de la vie du sol, de la nature minéralogique de ses roches mères et de tous les facteurs qui conditionnent son évolution pédologique : climat, situation topographique, nature physique de ses roches mères et du substratum, âge du sol et nature de la végétation.

En ce qui concerne les sols granitiques des pays tempérés on pourrait donc avancer que les sols chimiquement les plus fertiles sont ceux qui proviennent des granites les plus riches en biotites et en feldspaths calciques, sous les climats les moins humides, dans les situations topographiques permettant un rajeunissement constant du sol aux dépens de l'arène sous-jacente par érosion suffisamment ménagée. A ce point de vue il semble, en effet, que les sols de l'Est du Massif Central soient dans l'ensemble plus riches que ceux de l'Ouest ou de Bretagne (M. Coppenet, 1959).

En Auvergne l'expérimentation culturale a montré que les engrais phosphatés et surtout potassiques sont relativement peu rentables lorsqu'on opére dans les exploitations traditionnelles, c'est-à-dire très extensives. On peut penser en effet, que dans ces conditions : les exportations sont faibles, une bonne partie des éléments fertilisants retournant au sol par les déjections et le fumier, les pertes de potasse sont réduites aux pertes de purin et au drainage du sol, aussi la fertilité naturelle est suffisante dans bien des cas. Mais il est certain que dès que l'on voudra intensifier l'exploitation, les besoins en acide phosphorique et un peu plus tard en potasse, apparaîtront en même temps que des carences en oligo-éléments.

Les cultures des arbres fruitiers, même à grande production, peuvent être considérées comme peu exigeantes. C'est qu'en effet ces plantes pérennes ont non seulement de faibles besoins globaux, mais encore ils les satisfont lentement sur une plus grande période que les plantes annuelles. Dans ces conditions, la fertilité chimique naturelle est encore suffisante comme semblent le montrer en Auvergne le bel aspect des vergers croissant en sols granitiques, et qui plus est en sols d'alluvions riches en éléments granitiques et volcaniques, ainsi que l'inefficacité des fumures phospho-potassiques (L. Gachon et D. Collier, à paraître).

Enfin la nature des granites a une influence très importante sur la fertilité physique des sols qu'ils engendrent. Les granites qui s'arénisent donnent les sols les plus profonds, par conséquent présentant un plus grand espace vital et une plus forte réserve en eau. De plus ces granites sont aussi précisément les mieux pourvus en feldspaths calciques et biotites. Les sols qui en dérivent sont donc les plus fertiles à la fois physiquement et chimiquement. Dans les cas où le choix s'impose, il faut donc les réserver aux cultures, laissant les autres à la prairie ou à la forêt.

Emploi comme engrais de minéraux ou de roches broyées.

La richesse totale des roches primitives en éléments fertilisants a fait depuis longtemps préconiser comme engrais l'emploi des roches ou de leurs minéraux broyés, et en particulier du granite et des feldspaths à cause de leur teneur en potasse.

On a retenu à ce sujet quelques publications récentes : I. Gisiger (1952) et J. Geering (1952) n'observent aucun effet de poudres de roches ni sur la quantité, ni sur la qualité des récoltes respectivement sur prairies et sur cultures de pommes de terre ou de légumes.

Par contre T. R. Swanback (1950) constate que le granite broyé remplace avantageusement les engrais potassiques traditionnels pour la culture du tabac par amélioration surtout de la qualité, tandis que A. Nemek (1950) signale que la poudre de basalte se comporte comme un excellent fertilisant dans des sols sableux podzoliques.

Les poudres de roches ont d'autant plus de chance d'être efficaces que les roches sont plus basiques, qu'elles sont plus finement broyées et qu'on les emploie dans des sols de fertilité chimique naturelle nulle comme les sables quartzeux où les engrais solubles draineraient facilement, et pour des cultures peu exigeantes, demandant cependant un approvisionnement soutenu comme les arbres.

CONCLUSIONS

Pendant longtemps on a cru avec FOURNET que l'aspect crayeux pris par certains feldspaths dans les granites en voie d'altération, relevait du même phénomène que celui auquel on attribue la formation des gîtes de kaolin : la *kaolinisation* des feldspaths potassiques, le kaolin étant considéré comme un résidu d'attaque *in situ* (pseudomorphose) par l'eau plus ou moins chargée de gaz carbonique, laquelle entraîne les bases et l'excès de silice ; *première hypothèse* que l'on retrouve encore de nos jours dans certains traités classiques.

Or, DELAGE et LAGATU, observant l'état de pureté des minéraux dans les roches altérées ou les sols, proposent que la matière argileuse, pouvant d'ailleurs être de nature différente que le kaolin, résulte d'une *néoformation* à partir des produits de décomposition complète des minéraux de la roche : *seconde hypothèse*. De son côté J. de LAPPARENT constate que l'aspect crayeux pris par les feldspaths ne correspondent pas à une kaolinisation, mais à un *craquellement* de leur matière. Quant à la formation des gîtes de kaolin, il s'agit d'actions hydrothermales ayant eu lieu en profondeur à des températures et des pressions supérieures à celles qui existent à la surface terrestre.

Par la suite cette seconde hypothèse est confirmée, en ce qui concerne au moins les feldspaths, par certains faits nouveaux :

1°) La présence dans les arènes d'argiles de structure différente de la kaolinite,

2°) La kaolinite elle-même n'a pas la même structure qu'un feldspath,

3°) La possibilité de décomposition totale de tous les minéraux silicatés dans l'eau à la température ambiante, à condition qu'il y ait renouvellement de la solution,

4°) Si la synthèse des minéraux argileux à températures inférieures à 100° est difficile à partir de gels colloïdaux de silice et d'alumine, elle a été réussie par précipitation à partir de solutions ioniques dont les concentrations sont voisines des solutions naturelles, pour un certain nombre de phyllites, mais non la kaolinite,

5°) Dans les conditions naturelles comme dans les expériences, la nature des argiles dépend des conditions du milieu de genèse : pH et cations en présence.

Cependant la première hypothèse se vérifie pour certains minéraux comme les micas qui peuvent se transformer par échanges d'ions en une série d'argiles, ces minéraux appartenant à la même famille de structure. D'ailleurs ces transformations dépendent aussi des conditions de milieu et sont réversibles. De plus les micas peuvent se décomposer complètement comme les autres minéraux, quand les solutions sont suffisamment renouvelées.

La cause première de l'altération chimique des roches silicatées est l'action *d'hydrolyse*, par suite de l'échange des ions H^+ de l'eau ou des acides qu'elle tient en solution (surtout CO_3H_2) contre les ions basiques des minéraux et cette action

est d'autant plus complète que les solutions sont renouvelées. Au contraire la cristallisation de certains produits d'hydrolyse est favorisée par le non renouvellement des solutions et l'association des minéraux : la nature des produits obtenus résulte des conditions de milieu ainsi réalisées. Les processus d'altération et leurs résultats dépendent donc finalement des facteurs qui agissent sur l'intensité d'hydrolyse et celle du lessivage intercristallin ; d'où le rôle important que doit jouer, déjà à ce point de vue, la porosité de la roche.

Ainsi en pays tempéré, l'altération météorique d'un gisement de granite présente deux zones d'altération, dont la séparation est progressive s'il n'existe pas de nappe aquifère à faible profondeur. Une zone profonde où la circulation très lente de l'eau permet la cristallisation de la *séricite*, surtout au sein des feldspaths plagioclases. Une zone superficielle où le lessivage plus important intensifie l'hydrolyse de certains minéraux conduisant à la *microdivision* surtout des plagioclases, causes principales de l'*arénisation* de la roche ; entre les cristaux ou leurs plans de clivage il se forme des minéraux ferriques ou titanés et de petites quantités d'argiles. Le bilan chimique de l'opération se solde par une hydratation et une perte des éléments non fixés dans l'ordre suivant d'importance relative :

$$Ca > Na > Mg > K — Si — Al,$$

le classement du Fe étant davantage variable avec les modalités de lessivage. Le quartz et les minéraux alcalins sont à peine touchés et le taux d'altération chimique reste finalement très faible : de quelques unités pour cent. L'opération pourtant d'origine chimique a surtout conduit à une désagrégation de la roche et une division principalement des plagioclases et des biotites pouvant aller jusqu'au stade monocristal.

Si les fissures superficielles recueillent des dépôts plus ou moins grossiers entraînés par les eaux dans les diaclases profondes ou au niveau des sources, il peut se former à partir des solutions ou pseudosolutions que constituent les eaux d'infiltration des argiles de nature diverse plus ou moins mêlées d'hydroxydes de fer.

L'aptitude des granites à l'arénisation est fonction non seulement de l'altérabilité chimique de ses minéraux, mais aussi de sa porosité pour l'eau. Pour les granites l'altérabilité chimique croît avec la proportion des feldspaths plagioclases et secondairement des biotites. La porosité augmente avec la grosseur du grain, mais dépend aussi de la structure et de la microfissuration produites par des tensions internes après la consolidation du gisement. Ce sont ces dernières qui expliqueraient la formation de boules à partir d'un même gisement. La faible altérabilité chimique coïncide avec la faible porosité dans les matériaux non arénisables que sont les roches filoniennes de mise en place tardive.

L'arénisation ne se produit plus en l'absence d'eau par suite, soit du gel permanent dans les régions polaires ou de hautes montagnes, soit de la rareté des précipitations dans les déserts. En pays tropicaux, l'altération débute en réalité par les

mêmes phases : séricitisation et microdivision des feldspaths provoquant l'arénisation, mais la permanence d'une température plus élevée accroissant la vitesse d'hydrolyse, le milieu devient alcalin, la silice est donc facilement évacuée, même celle du quartz, permettant l'isolement d'hydroxydes d'alumine caractéristiques de la *ferralitisation* et une véritable kaolinisation in situ même des feldspaths potassiques ; dans ces conditions le degré d'altération chimique peut atteindre 80 p. 100.

Contrairement aux laves basiques à structure fine, les granites : roches acides à structure grenue, sont résistants à l'altération chimique, mais facilement pénétrables par l'eau, expliquant que ces roches soient plus « tendres » en pays tempérés et plus « dures » en pays tropicaux que les laves.

* * *

Dans les sols des régions tempérées, l'altération chimique est considérablement accrûe, par rapport à l'arène du fait des actions biologiques, mais elle reste encore faible : 20 p. 100 ; les quartz et minéraux potassiques sont toujours peu touchés ; la destruction des feldspaths potassiques doit surtout se faire par frottement au sein des eaux courantes. Par contre, en pays tropicaux, l'action de la végétation se limite à une influence sur la dynamique de certains éléments dans la partie superficielle du profil d'altération.

* * *

Les sols granitiques présentent une certaine fertilité chimique naturelle par suite des minéraux non quartzeux qu'ils contiennent : surtout les feldspaths calciques et les biotites. Cette fertilité est donc fonction de la composition minéralogique de la roche mère, mais encore de l'intensité du lessivage et de l'érosion, de l'intensité d'exploitation du sol et de la durée d'action de ces facteurs. Les granites arénisés donnent les sols les plus fertiles à la fois physiquement et chimiquement parce que les plus profonds et susceptibles d'êtres les plus riches en minéraux calciques et ferromagnésiens. Cette fertilité chimique naturelle sera toujours insuffisante en culture intensive.

* * *

Malgré les progrès considérables qui ont été réalisés dans ce dernier quart de siècle, il faut reconnaître qu'on est encore insuffisamment informé sur les processus intimes de décomposition des minéraux et de synthèse des argiles, en particulier de la kaolinite suivant les différentes conditions de milieu. En ce qui concerne les diverses formes d'altération observées dans la nature, on reste dans l'incertitude des conditions dans lesquelles elles se sont produites, notamment les conditions climatiques ; c'est justement le cas de nos arènes. Il conviendrait donc de ne tenir compte que des altérations exactement datées ; dans cette optique, l'étude comparée des altérations actuelles sous les différents climats du globe serait certainement très féconde. L'étude de la constitution minéralogique des divers dépôts de fissure ou de source suivant leurs conditions de gisement, serait de nature à contribuer à la connaissance des processus naturels de synthèse des argiles.

Reçu pour publication en juin 1961.

RÉSUMÉ

En ce qui concerne l'altération des granites, l'auteur présente successivement les faits d'observation prolongés par l'analyse granulométrique, minéralogique et chimique, les faits d'expérience, et l'historique des interprétations du phénomène. On peut résumer très brièvement ses conclusions ainsi qu'il suit :

L'arénisation des granites en pays tempérés résulte non pas de la kaolinisation généralisée des feldspaths comme on l'a cru primitivement. mais de la microdivision principalement des feldspaths par suite de la formation de centres d'hydrolyse, phénomène d'autant plus intense que ces feldspaths sont plus sodiques et surtout plus calciques.

L'aptitude à l'arénisation des granites est donc liée non seulement à la proportion des plagioclases et secondairement des biotites, mais aussi à la pénétrabilité de l'eau conditionnée par la grosseur du grain, la structure et la microfissuration de la roche produite par des tensions après sa consolidation.

La nature des produits d'altération formés dépend essentiellement des micro-conditions physico-chimiques du milieu rocheux (pH et nature des cations) ; elles-mêmes fonction de la nature des minéraux, de la température et de la vitesse de la circulation de l'eau.

Quand cette dernière est très lente, en zone profonde, il y a séricitisation des plagioclases ; en zone superficielle la circulation plus rapide provoque une micro-division des feldspaths, cause de l'arénisation, accompagnée d'une faible argilisation *in situ* (quelques unités pour cent). Cette argilisation peut se manifester plus profondément en aval dans les diaclases et au niveau des sources à partir des eaux d'infiltration. Dans les sols, l'action des facteurs biologiques provoque une altération chimique nettement plus élevée que dans les arènes, qui peut s'élever jusqu'à 20 p. 100.

En pays tropicaux, l'altération des granites débute par les mêmes stades : séricitisation et arénisation ; mais la température des eaux étant plus élevée, l'augmentation de la vitesse d'hydrolyse rend le milieu alcalin, permettant une individualisation des hydroxydes d'aluminium et une kaolinisation intense par suite de la libération plus complète de la silice. Dans ces conditions l'altération chimique peut atteindre 80 p. 100, les facteurs biologiques n'intervenant que dans la dynamique de certains éléments au sommet du profil d'altération.

SUMMARY

DISCUSSION OF THE PROCESS OF ALTERATION OF GRANITE UNDER TEMPERATE CLIMATES

In respect of the alteration of granites, long-term physical, chemical and mineralogical observations, practical facts, and history of the interprétation of the process are presented and the following conclusions are drawn :

The formation of sand from granites (arenisation) under a temperate climate does not only result from the general kaolinisation of feldspars, as previously arsumed, but also from the microdivison mainly of feldspars as a consequence of the formation of centres of hydrolysis, the intensity of which increases with increasing natrium and especially calcium contents of the feldspar.

The arenisation of granites is thus associated not only with the proportions of plagioclase and biotite, but also with water penetration depending on grain size, structure, and micro-fissures produced in the rock by tensions following its consolidation.

The nature of products formed by alteration depends mainly on physico-chemical microconditions in the rock (pH and nature of cations), which are governed by the nature of minerals, temperature and rate of water circulation.

If water circulation is slow in the deep zone, there occurs an asericitisation of plagioclases ; the faster circulation in the surface zone leads to a micro-division of feldspars, causing arenisation accompanied by a slight clay formation *in situ*. This clay formation may occur in diaclases downsloyse and at the level of infiltrating spring waters. In soils, biological factors cause a much greater chemical alteration thare in the sands, often amounting to 20 %.

In tropical countries, the alteration of granites starts by the same stages : sericitisation and arenisation ; increased hydrolysis higher water temperatures turns the medium alkaline, leading to an individualization of aluminium hydroxides and to intensive kaolinization as a consequence of a more complete liberation of silicon. Under these conditions, chemical alteration may amount to 80 %, since biological factors do not intervene except in the dynamics of certain elements at the top of the profile of alteration.

ZUSAMMENFASSUNG

RICHTIGSTELLUNG ZU DEN VERWITTERUNGSPROZESSEN BEI FRANITE IN MASSIG WARMEN GEBIETEN

Was die Verwitterung der Granite anbelangt, legt der Autor der Reihe nach, die beobachteten Gegebenheiten dar, welche durch die Körnungsanalyse, die mineralogische und chemische Analyse erweitert werden, experimentelle Tatsachen, sowie die Deutung dieser Erscheinung in geschichtlicher Hinsicht. Seine Schlussfolgerungen kann man folgendermassen kurz zusammenfassen :

Die Vergrusung der Granite in mässig warmen Gebieten entsteht nicht durch eine allgemeine Kaolinisierung der Feldspate wie man es zuerst annahm, sondern hauptsächlich durch eine Mikroteilung der Feldspate infolge Bildung von Hydrolysepunkten ; diese Erscheinung ist umso intensiver als die Feldspate soda-oder besonders kalkhaltig sind.

Die Fähigkeit der Granite zur Vergrusung ist daher nicht allein an den Plagioklasanteil und in sekundärer Weise an die Biotite gebunden, sondern auch an die Wasserdurchdringlichkeit die sich aus der Korngrösse ergibt, der Struktur und Mikrospaltigkeit des Gesteins welche nach seiner Verfestigung durch Spannungen entstanden.

Die Art der gebildeten Zersetzungsprodukten hängt in der Hauptsache von physiko-chemischen Bedingungen des Gesteinmediums ab (pH und Art der Kationen) ; dieselben sind ihrerseits Funktion der Mineralienart, der Temperatur und der Bewegungsgeschwindigkeit des Wassers.

Wenn letztere langsam vor sich geht, so findet in tieferer Zone eine Serizitisierung der Plagioklase statt ; in oberflächlicher Zone bewirkt die stärkere Bewegung, als Ursache der Vergrusung, eine Mikroteilung der Feldspate welche durch eine schwache Tonbildung in situ (einige Einheiten pro Hundert) begleitet wird. Die Tonbildung kann sich stromabwärts, in den Spalten, stärker äussern, sowie in Hähe der Quellen durch das Sickerwasser. Die Wirkung der biologischen Faktoren bewirkt in den Böden eine deutlich höher liegende chemische Verwitterung als in den Grusen, welche bis zu 20 % betragen kann.

In tropischen Gegenden, beginnt die Granitverwitterung mit den selben Stadien : Serizitbildung und Vergrusung ; infolge der höher liegenden Wassertemperaturen, entsteht durch die erhöhte Hydrolysengeschwindigkeit, eine Alkalinisierung des Mediums, welche zu einer Individualisierung der Aluminiumhydroxyden und einer intensiveren Kaolinisation, infolge vollständigerer Kieselsäurefreilegung, führt. Unter solchen Bedingungen, kann die chemische Verwitterung einen Wert von 80 % erreichen, die biologischen Faktoren greifen in die Dynamik gewisser Elemente nur an der Oberfläche des Verwitterungsprofils ein.

Справка о выветривании гранитов в странах умеренного климата.

КОЛЬЕ (Агростанция Центрального Массива Клермон-Ферран).

По поводу выветривания гранитов по порядку излагаются результаты наблюдений подтвержденные анализами физическим, минералогическим и химическим, результаты опытов, и дается историческая сводка об'яснений этого феномена. Можно резюмировать выводы автора очень кратко и сжато, следующим образом :

Аренизация гранитов в странах умеренного климата не является как это думали сперва результатом общей каолинизации фельдспатов, но, главным образом, их микро-разделением вызванным формированием центров гидролиза-явлением тем более интенсивным, чем больше содержат эти фельдспаты натрия и особенно извести.

Способность выветривания гранитов зависит таким образом не только от пропорции плагиоклазов и во вторую очередь биотитов, но также от водопроницаемости обусловленной размерами зерна, от структуры и микро-скважности породы вызванной напряжением после ее консолидации.

Природа сформированных выветриванием элементов зависит исключительно от физико-химических микро-условий среды породы (pH и природа катионов) обусловленных в свою очередь породой минераллов, температурой и скоростью передвижения воды.

Когда передвижение это весьма медленно в глубокой зоне происходит серицитизация плагиоклазов; в поверхностной-же зоне, где вода передвигается быстрее наблюдается микро-разделение фельдспатов являющееся причиной выветривания и сопровождаемое формированием глины на месте (несколько процентов). Формирование глины может также быть вызвано фильтрирующимися водами либо на уровне источников, либо вниз по течению глубже в диаклазах. Действие биологических факторов вызывает в почвах химическое выветривание, гораздо более обширное чем в аренах и могущее достичь до 20 %.

В странах тропического климата выветривание гранитов начинается с тех-же стадий : серитисизация и аренизация; но в виду более высокой температуры воды ускорение гидролиза ощелочает среду помогая выделению гидроокисей аллюминия и вызывая интенсивную каолинизацию благодаря более полному освобождению кремнезема.

В этих условиях, когда действие биологических факторов влияет на динамику только некоторых элементов верхов профиля выветривания, химическое выветривание может достичь до 80 %.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGAFONOFF V., 1936. Sols types de Tunisie Imp. Maury, Tunis, 49-62.

ALEXANDER L. T., HENDRICKS S. B., NELSON R. A., 1939. Minerals present in soil colloïds. II. Estimation in some representative soils. *Soil Sci.*, **48**, 273-279, (d'après Ann. Agron., p. 155, 1940).

ALEXANIAN C., 1951. Sur la présence de la montmorrillonite dans le feldspath altéré de quelques granites du Centre de la France. *C. R. Acad. Sci*, **233**, 1203.

ANDRÉ J., 1921. Chimie agricole. Baillère. Encyclopédie agricole. Paris.

BANNISTER F. A., 1951. Les espèces minérales trouvées dans les argiles et leur relation avec la géologie. *Bull. Groupe Fr. Argiles*, **4**, 2.

BASTISSE E.-M., 1951. Dix huit années d'études lysimétriques. *Ann. Agron.* 727.

BERRYL L. RUXTON B. P., 1959. Notes on weathering zones and soil on granite rocks in two tropical regions. *J. Soil Sci*, **10**, 54-63.

BERTHOIS L., 1949. Sur une forme particulière de l'horizon illuvial dans les sols podzoliques sur arène granitique. *C. R. Acad Sci*, **228**., 1042.

BETREMIEUX R., 1951. Étude expérimentale de l'évolution du fer et du manganèse dans les sols. *Ann. Agron.*, 193.

BIELER-CHATELAIN, 1910. Rôle des micas dans la terre arable. *C. R. Acad Sci*, **150**, 1132.

BIRDSALL M., 1951. Recherches sur les conditions de formation des alumino-silicates ferreux d'origine secondaire. *C. R. Acad Sci*, **233**, 1371.

BIROT P., 1947. Résultats de quelques expériences sur la désagrégation des roches cristallines. *C. R. Acad. Sci*, **225** , 745.

BIROT P., 1950. Note sur le problème de la désagrégation des roches cristallines. *Rev. Géom. Dynam.*, **6**, 271.

BIROT P., 1951. Sur la désintégration granulaire des roches cristallines. *C. R. Acad, Sci*, **233**, 1305.

BIROT P., 1953. Désintégration des roches cristallines sous l'action des sels. *C. R. Acad. Sci*, **237**, 1739.

BIROT P., 1958. Géomorphologie structurale. Presse Univ. France, Paris.

BIROT P., CAILLÈRE S., HENIN S., 1950. Étude du problème de la désintégration des roches cristallines. *Rev. Géom. Dynam.*, **6**, 272.

BLANCK E., 1929. Handbuch der Bodenlehre. Die verwitterungslehre und ihre klimatologischen Grundlagen. Berlin, **2**.

BONIFAS M., 1959. Contribution à l'étude géochimique de l'altération latéritique. *Mém. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine*, **17**.

BOUT P., 1953. Étude de géomorphologie dynamique en Islande. Herman Éd. Paris.

BRONGNIART A., MALAGUTI, 1839, 1841. Mémoire sur les kaolins ou argile à porcelaine. *Arch. Muséum Hist. Nat.*, **1**. 243 : **2**, 217.

BUTLER J. R., 1953. The geochemistry and mineralogy of rock weathering. The Lizard area Cornwall. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **4**. 157-178.

CAILLÈRE S., BÉTREMIEUX R., HENIN S., 1947. Examen des argiles de quelques sols tropicaux. *C. R. Acad Sci.*, **225**, 818.

CAILLÈRE S., BIROT P., HENIN S., 1952. Formation d'un minéral argileux par altération expérimentale d'un gabbro. *C. R. Acad. Sci*, **234**, 2104.

CAILLÈRE S., BIROT P., HÉNIN S., 1954. Étude expérimentale du mécanisme de la désagrégation de quelques roches éruptives et métamorphiques. *5e Conf. Intern. Sci. Sol.*, **2**, 18-22.
CAILLÈRE S., HÈNIN S., 1947. Formation d'une phyllite du type kaolinique par traitement d'une montmorillonite. *C. R. Acad Sci.*, **224**, 53.
CAILLÈRE S., HÈNIN S., 1947. Sur une synthèse de l'antigorite à basse température. *C. R. Acad. Sci*, **226**, 1439.
CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1948. Sur la préparation et quelques caractères d'une série d'aluminates hydratés. *C. R. Acad. Sci*, **226**, 580.
CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1951. Étude de l'altération de quelques roches en Guyane. *Ann. Agron.*, 414.
CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1951. L'altération des roches gabbroïques en Guyane. *C. R. Acad. Sci*, **232**, 1314.
CAILLÈRE S., HÉNIN S., 1951. Étude de quelques altérations de la phlogopite à Madagascar. *C. R. Acad. Sci.*, **233**, 1383.
CAILLÈRE S., HÉNIN S., BIROT P., 1955. Essais d'altération artificielle de quelques roches. *C. R. Acad. Sci.*, **240**, 1411.
CAILLÈRE S., HÉNIN S., BIROT P., 1957. Sur la formation transitoire de montmorillonite dans certaines altérations latéritiques. *C. R. Acad. Sci.*, **244**, 788.
CAILLÈRE S., HÉNIN S., ESQUEVIN J., 1953. Recherches sur la synthèse des minéraux argileux. *Bull. Soc. Fr. Minéral. Cristallogr.*, **76**, 300.
CAILLÈRE S., HÉNIN S., ESQUEVIN L., 1955. Influence de la température sur la vitesse de formation de l'antigorite nickelifère. *C. R. Acad. Sci.*, **241**, 810.
CAILLÈRE S., HÉNIN S., ÉSQUEVIN J., 1957. Synthèse des minéraux argileux. *Bull. Groupe Fr. Argiles*, **9**, 67.
CAILLÈRE S., HÉNIN S., GUÉNELON R., 1949. Transformation expérimentale du mica en divers types de minéraux argileux par séparation des feuillets. *C. R. Acad Sci.*, **228**, 1741.
CAILLÊRE S., HÉNIN S., MÉRIAUX S., 1947. Passage expérimental de la montmorillonite à une phyllite à équidistance stable de 14 Å. *C. R. Acad. Sci.*, **224**, 842.
CAILLÈRE S., HÉNIN S., MÉRIAUX S., 1948. Transformation expérimentale d'une montmorillonite en une phyllite à 10 Å type phyllite. *C. R. Acad. Sci.*, **226**, 680.
CAPDECOME L., FARRAU J., ORLIAC M., 1953. Minéralogie et Géotechnique. *Technique Moderne Construction*, 151.
CAMERON F. K., BELL J. M., 1905. Les constituants minéraux des solutions des sols. *Bull. du Bureau des Sols du Départ. de l'Agr. des Etats-Unis*, Washington, 30 (d'après : *Ann. Éc nat. Agric.* Montpellier, 182, 1906).
CARBIENER R., 1957. Étude de quelques sols des Hautes Vosges. *Bull. A. F. E. S.*, 1000.
CAYEUX L., 1905. Sur l'état de conservation des minéraux dans la terre arable. *C. R. Acad. Sci.*, **140**, 1270.
CHATONIER D., 1957. Contribution à l'étude de la minéralisation des eaux en rapport avec la composition chimique du sol. *Thèse. G. de Bussac*, Clermont-Fd.
CLAISSE G., 1953. Étude de l'altération de la Charnockite de Man. *Ann. Agron.*, 45-52.
COLLIER D., 1949. Influence prépondérante de la roche mère sur la composition chimique des sols d'Auvergne. *C. R. Acad. Sci.*, **288**, 115.
COLLIER D., 1951. Sur l'altération des granites à gros grains en Auvergne. *S. R. Acad. Sci.*, **233**, 96.
COLLIER D., 1951. Contribution à l'étude de l'altération des granites et à l'évolution des sols sur les plateaux granitiques de l'Auvergne. *Bull. A. F. E. S.*, **23**.
COLLIER D., 1951. Sur l'altération des granites à grains fins en Auvergne. *C. R. Acad. Sci.*, **233**, 199.
COLLIER D., 1953. Intérêt de l'application de la fusion au bisulfate à certaines recherches pédologiques. *C. R. Acad. Sci.*, **236**, 321.
COLLIER D., 1953. Exemple d'application de la fusion au bisulfate à l'étude de l'altération des granites. *C. R. Acad. Sci.*, **236**, 519.
COLLIER D., ROBELIN M., 1959. Contribution à l'étude de la dynamique de l'eau et des substances chimiques dans les sols argilo-calcaires de Limagne. *Ann. Agron.*, 415-453.
COPPENET M., 1959. Les caractères des sols granitiques de Bretagne. *Bull. A. F. E. S.*, 1-25.
CORBELL J., 1959. Uqe nouvelle méthode d'étude des régions calcaires. *Rév. Géom. Dynam.*, 45.
CORRENS C. W., 1951. La descomposicion quimica de los silicatos en el Laboratorio y en el suelo. *Ann. Edafol. Fisiol. Vég.*, **10**, 625-635.
DAUBREE A., 1879. Études synthétiques de géologie expérimentale. *Dunod*, Paris, (Voir aussi : *C. R. Acad. Sci.*, **44**, 997-1857, et **64**, 339, 1867).
DEJOU J., 1959. Étude comparative des phénomènes d'altération sur granite porphyroïde de Lormes et sur anatéxites à cordiérite du Morvan-Nord et des sols qui en dérivent. *Thèse Clermont-Ferrand.*
DEKEYSER W. L., DEGUELDRE L., 1955. Note concernant l'étude du vieillissement accéléré d'un granite katangais. *A. S. Sci. Col. Belg.*, 1, 2, 389-399.
DEKEYSER W. L., HOEBECKE F., KEYMEULEN VAN J., 1955. Les minéraux argileux des polders et de quelques autres régions naturelles. *I. R. S. I. A.*, **14**, 129-161, (d'après : *Bull. A. F. E. S.*, p. 239, 1955).
DEKEYSER W. L., KEYMEULEN Van J., HOEBECKE F., RIJSSEN Van A., 1955. L'altération et l'évolution des minéraux argileux. *I. R. S. I. A.*, **14**, 95-101.
DELAGE A., LAGATU H., 1905. Sur les résultats obtenus par l'observation des terres arables en plaques minces. *C. R. Acad. Sci.*, **140**, 1555.
DELAGE A., LAGATU H., 1904. Sur la constitution de la terre arable. *C. R. Acad. Sci*, **139**, 1043.
DELAGE A., LAGATU H., 1904. Sur les espèces minérales de la terre arable. *C. R. Acad. Sci*, **139**, 1233.
DEMOLON A., 1948. La dynamique des sols. *Dunod*, Paris.
DEMOLON A., BASTISSE E., 1936. Genèse des colloïdes argileux dans l'altération du granite en cases lysimétriques. *Ann. Agron.*, 803.
DEMOLON A., BASTISSE E., 1946. Observations sur les premiers stades de l'altération spontanée d'un granite et la genèse des colloïdes argileux. *C. R. Acad. Sci*, **223**, 115.

DERRUAU M., 1952. Les caractères différentiels des roches du socle dans l'Ouest et le Sud-Ouest du Massif Central français. *Publ. Fac. Lettres, Univ. Clermont.* (Inst. Géogr.), 6.
DERRUAU M., 1956. Précis de Morphologie. *Masson,* Paris.
DERRUAU M., 1960. Quel était le climat du Massif Central français pendant la seconde moitié de l'ère tertiaire? *Rev. Auvergne,* **74,** 179.
DUCHAUFFOUR P., Pédologie. *Centre de Documentation Universitaire,* Paris.
DUFFAUT P., 1957. Sur la genèse des « boules » de certains granites. *C. R. Soc. Géol. Fr.,* **8,** 139.
DUMONT J., 1909. Sur la décomposition chimique des roches. *C. R. Acad. Sci,* **149,** 1390.
EBELMEN M., 1845. Sur les produits de la décomposition des espèces minérales de la famille des silicates. *Ann. Mines,* **7,** 3.
EDELMAN C. H., SCHUFFELEN A. C., 1947. On the origin of some clay minerals in soils. *C. R. Conf. Pédol. mediterr.,* Alger-Montpellier, Ass. Fr. Ét. Sol, 109.
EDELMAN C. H., 1946. Les principaux sols de Java. *Rev. Int. Bot. Appl. Agric. Colon.,* 505-512. (d'après : *Ann. Agron.,* 283, 1947).
EHRART H., 1935. Traité de Pédologie. Strasbourg, Institut Pédologique, 1.
EHRART H., 1953. Sur les phénomènes d'altération pédogénétique des roches silicatées alumineuses en Malaisie Britanniques et à Sumatra. *C. R. Acad. Sci.,* **238,** 2012.
EMERSON P. D., 1928. Agricultural geology.
FIELDES M., SWINDALE L. D., 1954. Chemical weathering of silicates in soil formation. *Soil Bur. Depart. Sci., Indus. Res.,* **36,** 140-154.
FOURNET M. J., 1833. Mémoire sur la décomposition des minerais d'origine ignée et leur conversion en kaolin. *Ann. Chim. Phys.,* **55,** 225.
FRÉDÉRICKSON A. F., 1951. Mechanism of weathering. *Bull. Géol. Soc. Amer.,* **62,** 221.
GASTUCHE M. C., DELVIGNE J., FRIPIAT J. J., 1954. Altération chimique des kaolinites. *5e Congr. Int. Sci. Sol,* **2,** 439-456.
GEERING J., 1952. Quelle est l'action de la poudre de roche primitive? *Ann. Agric. Suisse,* **66,** 715-753.
GISIGER Van I., 1952. Compte-rendu d'un essai de fumure avec de la poudre de roche sur une prairie maigre. *Ann. Agric. Suisse* **66,** 710-713.
GOLDICH J. A., 1938. A study in rock weathering. *J. Geol.,* **46,** 17.
GOLDSCHMIDT V .M., 1945. The geochemical back ground of minor-element distribution. *Soil Sci.,* **60,**1-9.
GOVOROFF M., 1950. Ouvrage de Sedletzky sur les argiles. *Bull. Groupe. Fr. Argiles,* **2,** 1.
GRAHAM E. R., 1941. Colloidal organic acids as factors in the weathering of anorthite. *Soil Sci.,* **52,** 291-295.
GRAHAM E. R., 1950. The plagioclase feldspars as an Index to soil weathering. *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.,* **14,** 300.
GRIGGS D. T., 1936. The factor of fatigue on rocks exfoliation. *J. Geol.,* 783-796.
GRUNER J. W., 1939. Formation and stability of muscovite in acid solutions at elevated temperatures. *Amer. Mineral.,* **24,** 624.
GUILLIN H., 1928. Dissociation intégrale des silicates par l'acide carbonique et les acides humiques et réactions annexes. *C. R. Acad. Sci.,* **187,** 673.
HAUG E. M., 1921. Traité de géologie. *Armand Colin,* Paris.
HAWKINS R. H., GRAHAM E. R., 1950. Mineral content of the silt separates of some Missouri soils as those indicate the fertility level and degree of weathering. *Soil. Sci., Soc. Amer. Proc.,* **15,** 308.
HÉNIN S., 1947. La formation des argiles et la pédologie. *C. R. Confér. Pédol. Méditerr. Alger-Montpellier, Assoc. Franç. Ét. Sol.* 97.
HÉNIN S., 1954. Nouveaux travaux concernant la synthèse des minéraux argileux. *5e Congr. Int. Sci. Sol*; **2,** 505-508.
HÉNIN S., 1957. Essais de synthèse des minéraux argileux à partir de gels de silice. *C. R. Acad. Sci.,* **244,** 225.
HÉNIN S., PEDRO G., 1957. Mise en évidence d'un effet de dislocation du granite à biotite par traitement à l'eau oxygénée. *C. R. Acad. Sci.,* **245,** 1451.
HÉNIN S., ROBICHET O., 1953. Sur les conditions de formation des minéraux argileux par voie expérimentale basse température. *C. R. Acad. Sci.,* **236,** 517.
HÉNIN S., ROBICHET O., 1953. Synthèse des minéraux argileux à basse température. *Bull. Group. Fr. Argiles,* 1-4.
HÉNIN S., ROBICHET O., 1954. Nouveaux résultats concernant la préparation des minéraux argileux au laboratoire ; synthèse de l'antigorite. *C. R. Acad. Sci.,* **238,** 25-54.
HÉNIN S., ROBICHET O., 1955. Résultats obtenus au cours de nouveaux essais de synthèse de minéraux argileux. *Bull. Groupe. Fr. Argiles,* **6,** 19.
HÉNIN S., ROCIBHET O., RONCHET M. J., 1953. Altération expérimentale d'un schiste, comparaison avec un granite. *C. R. Acad. Sci.,* **237,** 1437.
HOSKING G. S., 1950. The soil clay mineralogy of some Australian soils developed on granitic and basaltic parent mineral. *J. Counc. Sci. Res.,* **13,** 206-215 (d'après : *Ann. Agron.,* 107, 1947).
HUTCHESON T. B., MC CALEB S. B., WOLTZ W. G., 1959. Potassium-sodium interrelationships : 2. Potassium and Sodium interactions in mineral systems. *Soils Sci.,* **88,** 36-44.
JACKSON M. L., SHERMANN G. D., 1953. Chemical weathering of minerals in soils. *Adv. Agron.,* 221-319.
JACKSON M. L., TYLER S. A., WILIS A. L., BOURBEAU C. A., PENNINGTON R. P., 1948. Weathering sequence of clay-size minerals in soils and sediments. I. — Foundamental generalizations. *J. Phys. Coll. Chem.,* **52,** 1237.
JACKSON M. L., HSEUNG Y., COREY R. B., EVANS E. J., VANDENHEUVEL R. C., 1952. Weathering sequence of clay-size minerals in soils and sediments. II. — Chemical weathering of Layer silicates. *Soil Sci., Soc. Amer. Proc.,* **16,** 3-6.
JEFFRIES C. D., ROLL B. N. KUNZ G. W., 1953. Micaweathering sequence in the Highfields and Chester soil profils. *Soil Sci., Soc. Amer. Proc.,* **17,** 337-339.
JUNG J., 1958. Précis de pétrographie. *Masson et Cie,* Paris.

KELLER W. D., FREDERICKSON A. F., 1952. Role of plants and colloidal acids in the mecanism of weathering. *Amer. J. Sci.*, **250**, 594-608.
KELLEY W. P., 1943. Mattson's Papers on « The laws of soil Colloidal behavior ». Review and Comments. *Soil Sci*, **56**, 443-456.
KEYMEULEN Van J., 1956. L'altération des minéraux micacés par l'acide carbonique. *C. R. Acad. Sci.*, **242**, 651.
KEYMEULEN Van J., DEKEYSER W., 1953. L'altération des minéraux micacés par l'acide carbonique. *C. R. Acad. Sci.*, **236**, 1367.
KIEFER C., 1950. Note sur les minéraux phylliteux et leurs altérations. *C. R. Acad. Sci.*, **230**, 977.
KUBIENA W. L., 1952. Les sols de l'Europe.
LACROIX A., 1893, 1896. Minéralogie de la France et de ses colonies. Paris. 1, 2.
LAPPARENT de J., 1909. Étude comparative de quelques porphyroïdes. *Bull. Soc. Fr. Minéral.*, **32**, 174.
LAPPARENT de J., 1923. Leçons de pétrographie. *Masson*, Paris.
LAPPARENT de J., 1941. Logique des minéraux du granite. *Revue Sci.*, 885.
LENEUF N., 1959. L'altération des granites calco-alcalins et des granodiorites en Côte d'Ivoire forestière et les sols qui en sont dérivés. O. R. S. T. O. M., Paris.
MALTERRE H., 1940. Premier stade d'altération des granites. (Note non publiée.)
MARTONNE de E., 1948. Traité de géographie physique. *Armand Colin*, Paris.
MATTSON S., 1930, 1931. The laws of soil colloidal behavior. Isoelectric precipitats. *Soil Sci*, **30**, 459-495, **31**, 57-77.
MEURICE R., 1941. Les divers modes d'altération des principaux minéraux par les agents naturels. *Bull. Inst. Agron. Gembloux*, **10**, 11.
MIHARA A. S., 1934. Forme de l'altération des feldspaths dans les arènes granitiques des Vosges. *C. R. Acad. Sci.*, **198**, 955.
MILLOT G., 1949. Relation entre la constitution et la genèse des roches sédimentaires argileuses. *Bull. Ass. Ing. Géol. Univ. Nancy*, **2**.
MILLOT G., 1950. Comparaison des indications de la pédologie et de la géologie au sujet de la genèse des minéraux argileux. *4e Congr. Int. Sci., Sol.*, **3**, 37 (d'après : *Ann. Agron.*, 466, 1951).
MOHR E. C. J., BAREN Van F. A., 1954. Tropical Soils. *Interscience Publishers*, New York.
MORIN M., 1951. La pédologie et les sources dans les pénéplaines granitiques. *Bull. A. F. E. S.*, 1-16.
MORTLAND M. M., LAWTON K., UEHARA G., 1956. Altération of biotite to vermiculite by plant growth. *Soil Sci.*, **82**, 477-481.
MUNTZ A., 1890. Sur la décomposition des roches et la formation de terre arable. *C. R. Acad. Sci.*, **110**, 1370.
NASH V. E., MARSHALL C. E., 1957. Cationic reactions of feldspar surfaces. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 149-153.
NEMEC A., 1950. Meliorace podzolu se stmelencem v polezi Zehrov hmojenim, cedycowim prachem. *Sb. Ceskosl. Akad. Zemed., ser.* B. **25**, 83-96.
NICOLAS J., 1951. Sur la genèse des kaolins de Plemet (Côtes-du-Nord). *C. R. Acad. Sci.*, **732**, 1862.
NICOLAS J., 1953. Sur le kaolin d'origine hydrothermale de Ploemeur (Morbihan). *C. R. Acad. Sci.*, **236**, 402.
NORTON H. F., 1939. Hydrothermal formation of clay minerals in the laboratory. *Amer. Mineral*, **24**, 1-17.
OBERLIN A., HÉNIN S., PEDRO G., 1958. Recherches sur l'altération expérimentale du granite par épuisement par traitement à l'eau oxygénée. *C. R. Acad. Sci.*, **246**, 2006.
ORLIAC M., 1950. Étude de l'altérabilité des roches granitiques. *Bull. Soc. Hist. Nat. Toulouse*, **85**.
PEDRO G., 1957. Nouvelles recherches sur l'influence des sels dans la désagrégation des roches. *C. R. Acad. Sci.*, **244**, 2822.
PEDRO G., 1957. Mécanisme de la désagrégation du granite et de la lave de Volvic, sous l'influence de sels de cristallisation. *C. R. Acad. Sci.*, **245**, 333.
PEDRO G., 1958. Étude par voie expérimentale du processus de formation des éléments fins par d'altération des roches à l'aide de l'eau pure. *Bull. Groupe Fr. Argiles*, **5**, 45.
PEDRO G., 1958. Premiers résultats concernant la réalisation expérimentale d'un processus de latérisation. *C. R. Acad. Sci.*, **247**, 1217.
PEDRO G., 1959. Considération sous une forme de l'altération des roches : l'arénisation. *C. R. Acad. Sci.*, **248**, 993.
PEDRO G., 1960. Genèse des minéraux argileux par évolution des matériaux amorphes provenant de l'altération de diverses roches. *C. R. Acad. Sci.*, **250**, 1697.
PEDRO G., 1960. Altération expérimentale des roches par l'eau sans atmosphère de CO_2. *C. R. Acad. Sci.*, **250**, 2035.
POLYNOV B. B., 1937. The cycle of weathering. *Murby*, London.
POLYNOV B. B., 1945. First stages of soil formation on massive crystalline rocks. *Acad. Sci., U. R. S. S. Pédol.*, 327-339. (d'après : *Ann. Agron.* 376, 1946).
PRIANICHNIKOFF, 1940. Agrochimie. 3e édit. Moscou.
RAGUIN E., 1957. Géologie du granite. *Masson et Cie*, Paris.
RINNE F., 1928. La science des roches. Traduit de l'allemand par L. BERTRAND. *Lamarre*, Paris.
RISLER E., 1898. Géologie agricole. Paris.
RIVIERE A., 1946. Contribution à l'étude des sédiments argileux. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 43
ROBINSON G. W., 1936. *Soils*. London.
RONDEAU A., 1956. Problème de morphologie régionale et d'érosion différentielle en Corse méridionale. *Bull. Assoc. Géol. Fr.*, 49.
RONDEAU A., 1958. Corse et Bretagne : à propos du modelé granitique de la zone de Trégastel (Côtes-du-Nord). Norois V., 451, (d'après : *Rev. Géom. Dynam.*, 63, 1959).
RONDEAU A., 1958. Les « boules » de granite. *Z. für Geomorphologie*, **2**, 210-229, (d'après : *Rev. Géom. Dynam.*, 185, 1958).

ROUGERIE H., 1960. Le façonnement actuel des modelés en Côte d'Ivoire forestière. *Thèse, I. F. A. N.*, Dakar, 58.
ROUGERIE G., 1961. Étude comparative de l'évacuation de la silice en milieux cristallins : tropical humide et tempéré humide (Premiers résultats). *Ann. Géogr.*, **70**, 277.
RUELLAN F., 1931. La décomposition et la désagrégation du granite à biotite du Japon et en Corée et les formes du modelé qui en résulte. *C. R. Congr. Inst. Géogr.*, Paris.
RUXTON B. P., BERRY L., 1957. Weathering of granite and associated erosional features in Hong-Kong. *Bull. Géol. Soc. Amer.*, **68**, 1263-1291.
SANCHEZ-CALVO M. D. C., 1955. Los investigaciones sobre la descomposicion quimica de los silicatos. *An. Edafol. Fisiol. Veg.*, **14**, 229-243.
SCHNYLENBORGH Van J., SANGER A. M. H., 1950. On the origin of clay minerals in the soil. *Landbouwkundig Tidjschrift*, **62** 347-358.
SCHOELLER M., 1953. La solubilité du fer dans les eaux souterraines. *Ann. Inst. Hydrol Clim.*, **26**, 78, 1-37.
STEPHENS L., 1952. A study of rock weathering with reference to the soils of the Malvern hills. A weathering of biotite and granite. *Journ. Of. Sci.*, **3** (d'après : *Ann. Agron.*, 831, 1952).
SWANBACK T. R., 1950. Granite stone meal as a source of potash for tabacco. *Connecticut Agric. Expt. Sta. B*, 536, 14.
TAMM O., 1945. Experimental studies on chemical processes in the formation of glacial clay. *Sveriges Geol. Undertok. aërsbok. Stockolm*, **18**, 1-20.
TAMM O., 1929. An experimental study on clay formation and weathering of felspars. *Medd. Stat. Skog. Amt.*, **2**, 1-28.
TARGULLAN V. O., 1959. On the primary stages weathering and soil formation on igneous rocks in tundra and taïga zones. *Pochvovedenié*, **11**, 37-48.
THÉNOZ B., 1956. Mesure de la perméabilité et de la porosité de roches très compactes. *C. R. Acad. Sci.*, **243**, 289.
VERNADSKY W., 1924. La géochimie. *F. Alcan*, Paris.
WALKER G. H., 1948-51. The decomposition of biotite in the soil. *Coll. Macaulay Inst.*, **18**, 11.
WHITNEY M., 1906. La fertilité des sols. *Farmer's Bull.* 257 (d'après : *Ann. Éc. Agr.* Montpellier, 88, 1907).

Ann. agron., 1961, **12** (3), 333-364

633. 61 : 631.811.3/4.

COMPARAISON DES PRÉLÈVEMENTS AZOTÉS ET POTASSIQUES D'UNE CULTURE DE BETTERAVE SUCRIÈRE EN ANNÉE SÈCHE ET EN ANNÉE HUMIDE

G. LEFEVRE

Avec la collaboration technique de G. HIROUX, Nicole BRACQUART, Yvette CAILLOUET

Station d'Agronomie, Amiens.

SOMMAIRE

A l'aide de traitements expérimentaux de fumure azotée et potassique, on a pu mesurer l'influence de conditions climatiques extrêmes, au cours d'années différentes, sur la production et la composition minérale, ramenées en vert et en sec, de betteraves sucrières.

Les variations observées permettent d'apprécier les répercussions qu'elles pourraient avoir, d'une part sur l'alimentation des animaux auxquels des feuilles et collets pourraient être donnés, et, d'autre part sur l'entretien minéral du sol.

INTRODUCTION

La variabilité des rendements peut être due à de nombreux facteurs. Les expériences annuelles de fumure mettent en comparaison des formes et des doses variées d'engrais, des époques et des modes différents d'application ; des expériences pérennes permettent d'examiner l'influence d'entretiens organiques ou minéraux antérieurs et cumulés. Dans tous les cas les résultats obtenus sont valables à condition de préciser encore les conditions de sol, les fumures et les cultures précédentes. Ces restrictions sont peu graves si, connaissant bien le milieu où les expériences sont implantées, le champ d'essai est précisément choisi pour répondre à une question posée dans un nombre de cas suffisamment important pour constituer justement un sujet local. A tous ces éléments de variations, se superpose l'influence des conditions climatiques, évidemment uniformes pour un champ d'essais, mais qui peuvent prendre une importance considérable, ne serait-ce que pour les fumures azotées. De plus les facteurs cli-

matiques peuvent être un facteur limitant, qui devient évident dans les années dites exceptionnelles, les cultures régionales étant naturellement adaptées aux conditions climatiques moyennes.

Dans les expériences, les fumures minérales, ou plus exactement l'entretien minéral du sol est calculé de façon à explorer les besoins... ou la capacité maximum d'absorption... des récoltes maxima escomptées. Lorsque les conditions climatiques restreignent les possibilités de production, il est intéressant de connaître l'influence de cette fumure, calculée trop largement, sur la richesse en vert, ou en sec, de la culture correspondante, afin, d'une part, de savoir si la teneur en éléments minéraux reste compatible avec une utilisation des résidus culturaux par les animaux et, d'autre part, d'apprécier la quantité totale sortie du champ et l'importance des résidus. Ces questions se sont posées pour la culture betteravière au cours de l'année 1959 et il nous a semblé utile de comparer, à ce point de vue, les résultats de deux expériences de fumure sur betteraves, dans des milieux à sols à peu près identiques. Mais les uns ont été obtenus en année normale, 1956, et les autres en année particulièrement sèche, 1959. Notre but est donc de comparer les teneurs et les exportations de cultures qui, dans la gamme des doses de fumure mises en comparaison, auraient dû, en dehors des conditions climatiques, présenter des parcelles de rendements identiques.

I. — COMPARAISON DES CONDITIONS CLIMATIQUES (TABLEAU I)

TABLEAU I

Résumé des conditions climatiques en 1956 et 1959

Amiens	Températures						Pluies				Température moyenne	Moyenne sur 25 ans des pluies
	56			59			56		59			
	Moyenne			Moyenne								
	des M	des m	du mois	des M	des m	du mois	Pluies mm	Nomb. de jours	Pluies mm	Nomb. de jours		
Décembre 55 ou 58	8,40	3,73	6,06	6,96	1,80	4,38	74,3	19	65,0	15	3,51	59,3
Janvier	7,05	2,13	4,59	4,46	— 0,59	1,93	68,2	23	74,5	19	3,04	61,1
Février	0,075	— 7,24	— 3,58	6,70	— 0,54	3,08	11,6	11	1,8	3	3,66	40,6
Mars	12,51	3,21	7,86	13,07	4,51	8,79	13,4	7	47,7	15	6,99	39,4
Avril	13,92	3,36	8,64	15,05	7,09	11,07	40,3	15	48,3	17	10,00	46,3
Mai	20,87	7,94	14,40	19,44	10,18	14,81	15,7	7	11,5	6	13,90	56,9
Juin	19,15	9,91	14,53	22,47	12,30	17,38	77,2	13	41,6	11	17,22	53,1
Juillet	23,30	13,20	18,25	25,63	14,64	20,13	60,4	14	36,3	5	19,04	54,8
Août	20,98	11,18	16,08	23,81	14,43	19,12	82,6	21	29,5	7	18,73	69,7
Septembre	21,56	12,12	16,84	23,85	10,52	17,18	63,6	16	11,9	2	16,06	58,1
Octobre	15,30	7,81	11,55	17,32	7,68	12,50	49,5	16	59,7	11	11,12	61,5
							Mai à septembre 299,5		Mai à septembre 130,8			Mai à septembre 292,6

Température :

1956 était caractérisé par des températures en dessous de la normale. Après le gel de février les températures n'ont jamais atteint (sauf en Mars) les moyennes de 25 ans observées à Amiens.

Par contre en 1959 dès le mois de Mars il a fait constamment plus chaud.

Pluies :

Les deux années mises en comparaison ont eu jusqu'en Mai des chutes de pluies inférieures aux moyennes. Mais en 56 à partir de Juin et au cours de Juillet-Août-Septembre, mois au cours desquels se place la forte végétation de la betterave, les pluies ont été au contraire abondantes.

En 1959 la sécheresse a été suffisamment évidente pour créer une situation classée dans les calamités.

II. — COMPARAISON DES CONDITIONS D'EXPÉRIENCE (SOLS ET FUMURES)

Les récoltes, retenues en 1956, proviennent du champ permanent d'Allonville, destiné à mettre en comparaison des formes d'azote (nitrate de soude, nitrate de chaux, ammonitrate — o) en présence de 3 doses de potasse.

Les antécédents de ce champ peuvent être résumés de la façon suivante :

Fumure / Culture	N		P_2O_5	K_2O		
	Nitrate de soude Nitrate de chaux Ammonitrate	0		K_0	K_1	K_2
Luzerne dernière coupe enfouie 54 Betteraves......	100	0	120	0	150	300
Verts enfouis 1954-55 Blé.........	40 + 30	40 + 30 + 30	80	0	40	80
Trèfle Ladino 56 Betteraves	120	0	120	100 erreur	150	300
Total après 3 ans				100	340	680

12 traitements, 4 répétitions = 48 parcelles.

Sol de limon moyen (145 p. 1000 d'argile) dosant au départ 0.13 p. 1000 de K_2O échangeable.

Pour 1959 les résultats proviennent d'un deuxième champ permanent, situé à Omiécourt, mettant aussi en comparaison 3 doses de potasse mais associées à 3 doses d'azote.

	N			P_5O_5	K_2O(Sulfate de Chlorure)			
	0	1	2		0	1	2	3
1957 pommes de terre	0	50	120	150	0	100	200	300
1957-58 Blé.........	40 + 20	60 + 30	60 + 60	100	0	50	100	150
1959 Betteraves......	70	140	210	150	0	100	200	300
Total après 3 ans........					0	250	500	750

21 traitements, 3 répétitions, 63 parcelles.

Sol de limon moyen (140 p. 1000 d'argile dosant au départ 0.10 p. 1000 de K_2O échangeable.

III. RÉSULTATS

L'ensemble des résultats sera présenté dans des graphiques, afin de mieux saisir qu'avec des tableaux de chiffres, les comparaisons. Il y a eu, parfois, une incompatibilité entre la grandeur de l'échelle, nécessaire pour mettre en évidence l'influence des traitements, et l'amplitude des variations relevées. Dans ce cas la comparaison entre les années, indiquée par un schéma est détaillée dans des graphiques portant le même numéro.

1° *Matière verte.*

Le schéma I et les graphiques Ia, Ib, Ic donnent, en fonction des doses, de potasse apportées, les rendements/hectare en verts (feuilles et collets), racines et total.

En 1956, à part les parcelles sans azote où la production de feuilles est nettement inférieure, les tonnages des deux parties de la plante sont assez comparables et compris entre 50 et 60 tonnes, fournissant un total peu variable autour de 110 tonnes de Matière verte à l'Ha. La proportion de chacune des parties est fonction de la fumure azotée et varie peu en fonction de la fumure potassique.

En 1959, année sèche, les verts avoisinent 10 T. les racines varient de 12 à 15 tonnes et la production globale est relativement plus variable, allant de 20 à 28 tonnes. L'effet de l'engrais potassique est plus marqué, bien que le résultat reste très faible. L'action de l'azote au contraire est peu sensible.

2° *Matière sèche.*

a) *Teneur en matière sèche.* (Graphique 2). — En 1956, la teneur en matière sèche des feuilles et collets (partie parfois consommée par les animaux) est normale et voisine de 10 p. 100 et un peu plus élevée dans les parcelles sans azote. Pour les racines cette teneur tourne autour de 21 p. 100.

En 1959, la richesse des feuilles et collets peut atteindre 30 p. 100 (2 fois la normale) et ne descend pas en dessous de 22 p. 100 (2 fois la normale). Ce facteur est un des plus importants en ce qui concerne l'alimentation animale, car il augmente considérablement, comme nous le verrons par la suite, la richesse minérale des feuilles consommées à l'état vert. Quant aux racines, elles sont simplement un peu plus sèches (21.7 p. 100 à 24. 7 p. 100) environ 10 p. 100 de plus que la normale.

b) *Rendement/Ha en sec.* — Le schéma 3 et les graphiques 3a et 3b montrent immédiatement que Le tonnage sec global 1959 est à peine supérieur (et dans certains cas inférieur) au poids sec des feuilles seules d'une année normale.

Pour cette dernière le rendement sec des racines est plus du double de celui des feuilles et collets, le total étant compris entre 16 et 18 T/ha.

En 1959, pour l'ensemble des traitements, les feuilles et collets pèsent environ 1 tonne de plus que les racines, le total s'échelonnant entre 5 et 7 tonnes/Ha.

Le tonnage des feuilles, en sec, est environ moitié de celui d'une année normale, celui des racines étant approximativement égal au tiers.

3° *Richesses et exportations en éléments mis en expérience* (N et K)

A — *Azote.*

a) *Teneurs par rapport à la matière sèche* (Graphique 4). — La teneur en azote des racines normales est nettement plus faible que celle des betteraves ayant végété en condition sèche ; la différence entre les deux pouvant aller du simple au double (0.8 à 1.6 p. 100).

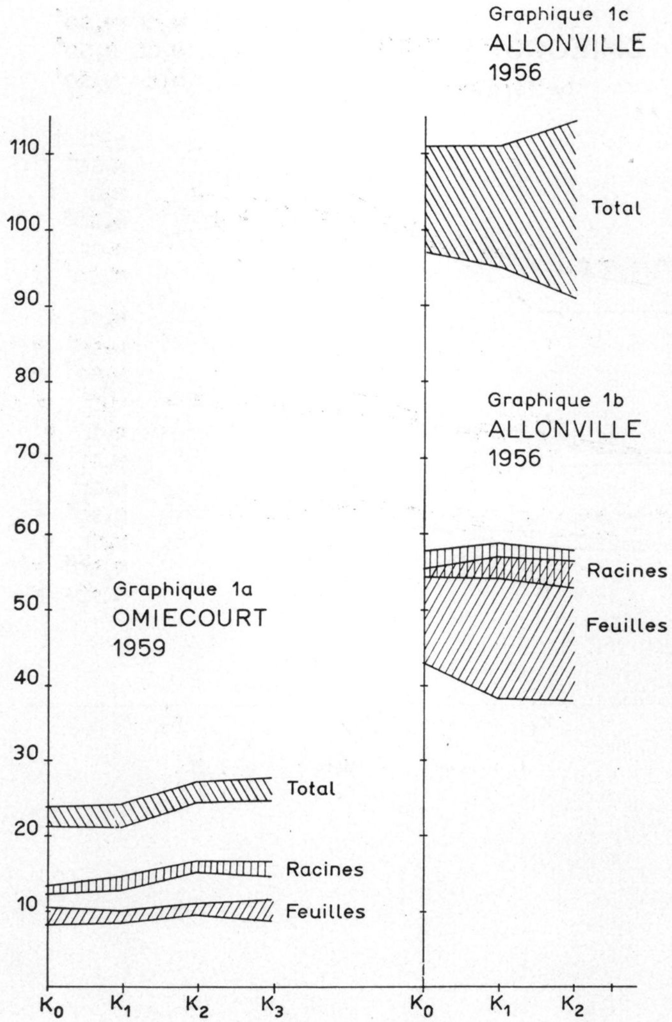
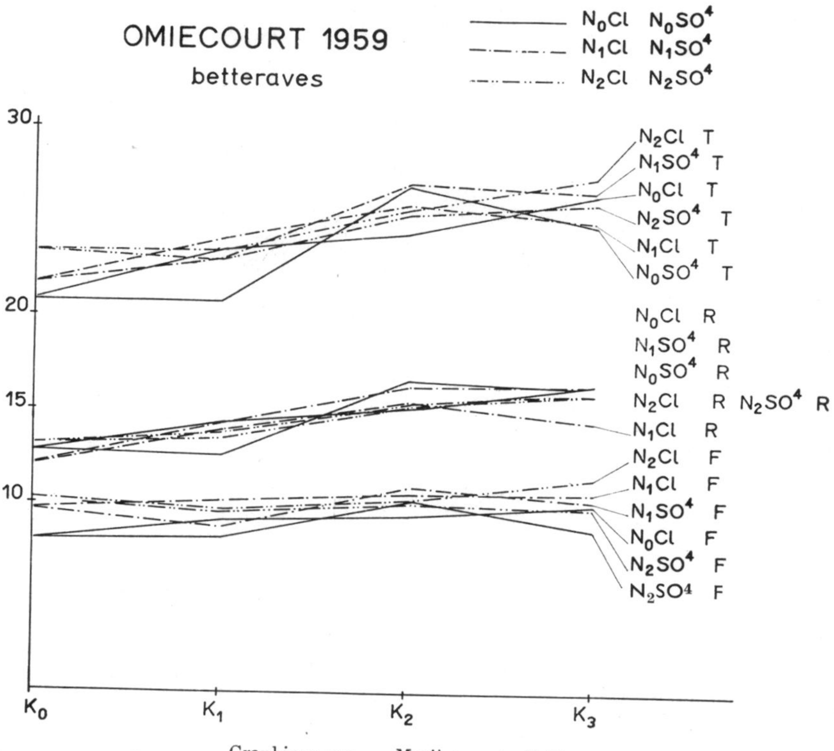
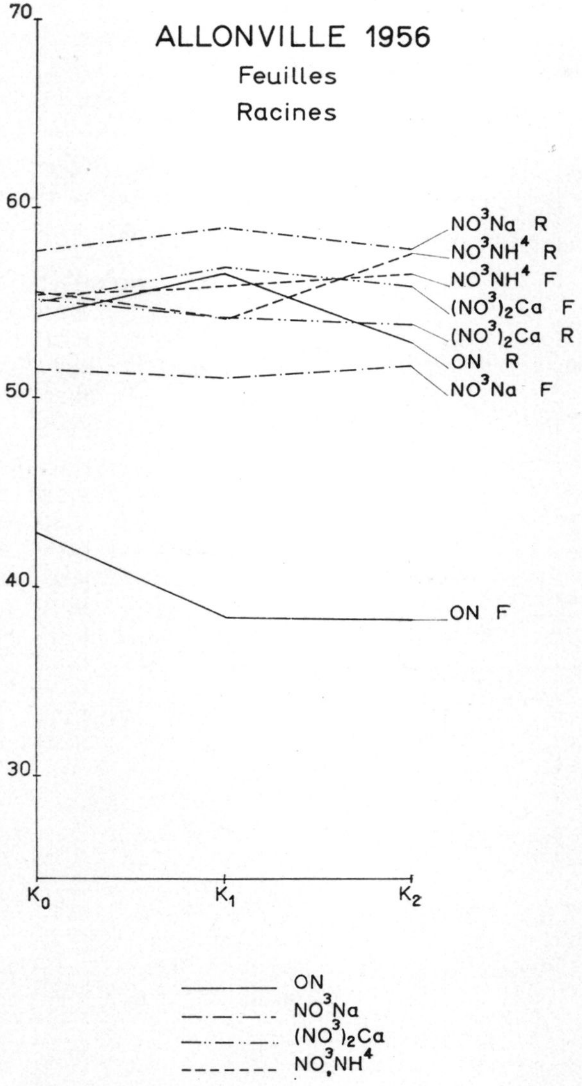


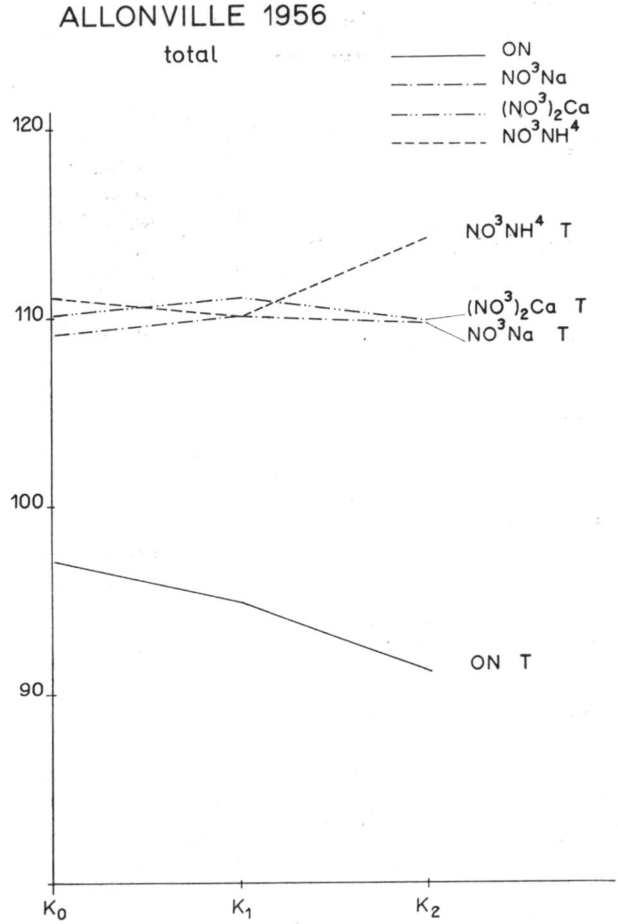
Schéma 1. — Matière verte T/Ha.



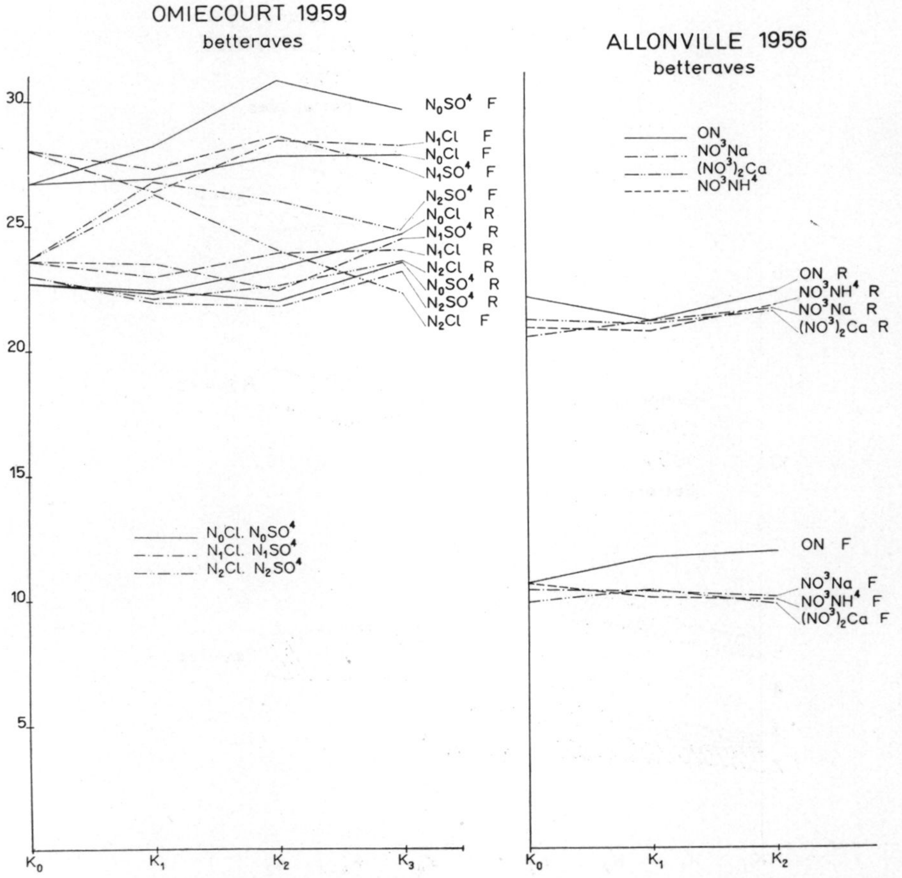
Graphique 1 a. — Matière verte T/Ha.



Graphique 1 b. — Matière verte T/Ha.



Graphique I c. — Matière verte T/Ha.



Graphique 2. — Matière sèche %.

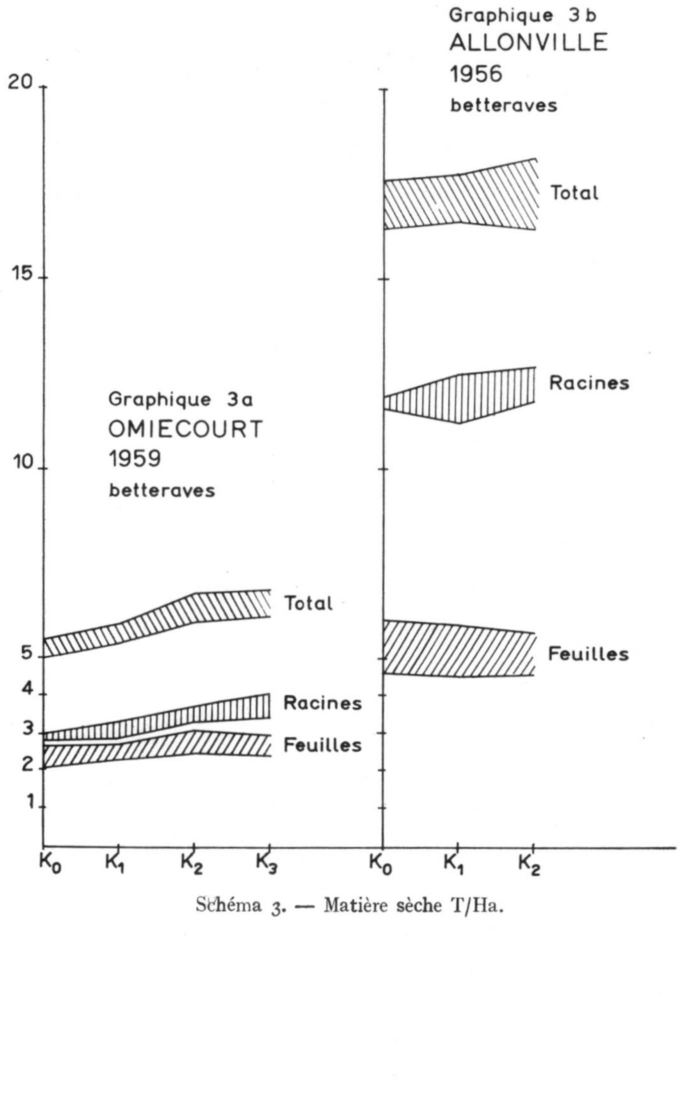
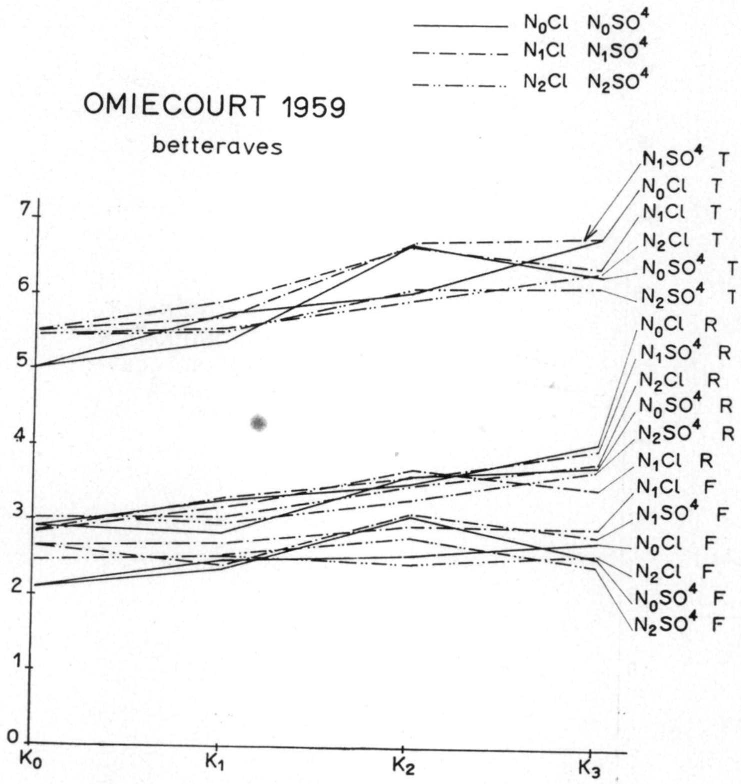
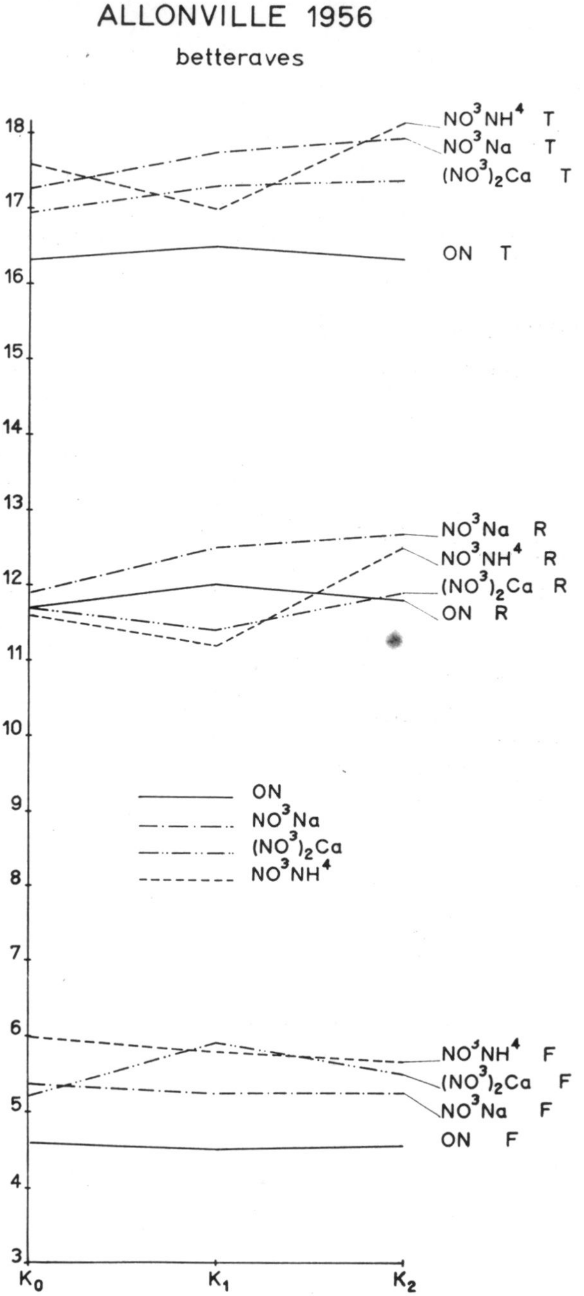


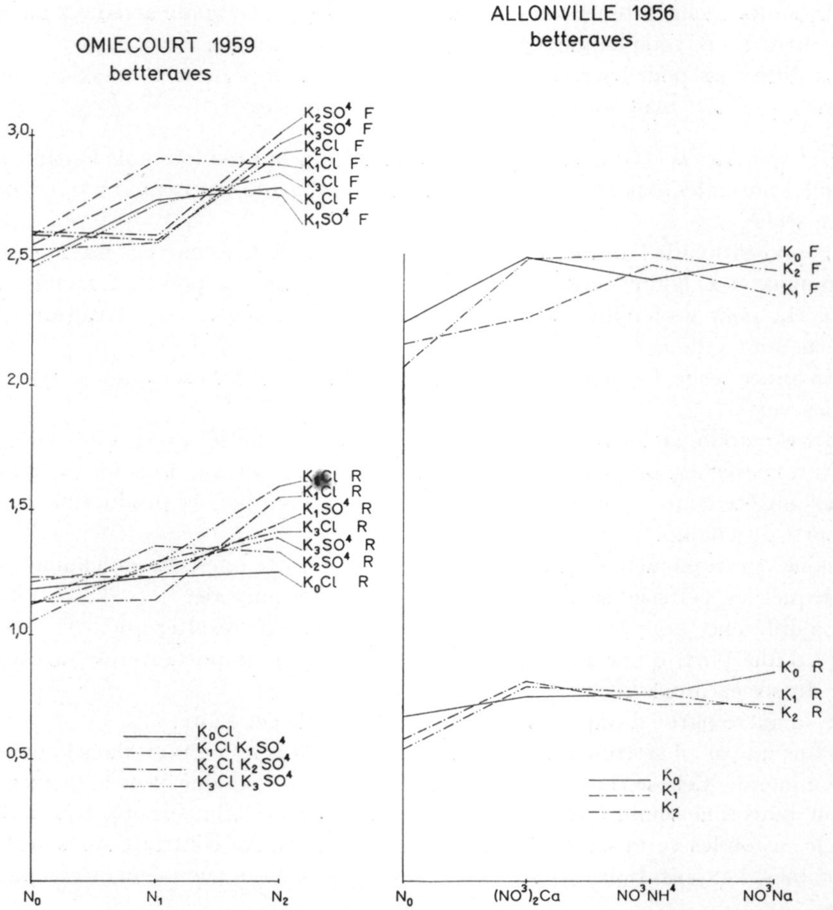
Schéma 3. — Matière sèche T/Ha.



Graphique 3 a. — Matière sèche T/Ha.



Graphique 3 b. — Matière sèche T/Ha.



Graphique 4. — N ‰ sec.

Pour les feuilles cette différence est moins marquée, le maximum des unes atteignant le minimum des autres.

b) *Teneurs exprimées en vert.* (Graphique 5). — Ces remarques sont inversées lorsqu'on exprime les résultats par rapport à la matière verte, par suite des variations de teneur en matières sèches. Ceci prend de l'importance lorsque les feuilles sont consommées.

En année sèche la teneur des feuilles a dépassé 7 p. 1000 pour atteindre même 8 p. 1000 contre 2.5 p. 1000 en moyenne pour une année normale.

La différence pour les racines se maintient à peu près au même niveau que pour es résultats en sec, mais est encore un peu plus marquée.

c) *Exportations.* (Graphique 6). — Comme pour la production de matière sèche, les feuilles normales exportent autant et même plus d'azote que la production totale de l'année sèche.

L'exportation de l'année humide correspond aux chiffres moyens retenus généralement pour une bonne production betteravière, 90 kg/Ha pour les racines, 125 à 140 kg/Ha pour les feuilles. Ces chiffres valent également pour la restitution lorsque les verts sont enfouis.

En année sèche, l'exportation a été de 35 à 55 kg pour les racines et de 65 à 80 kg pour les verts.

Grosso modo, la consommation a été diminuée de moitié. En ce qui concerne les exportations réelles, on peut dire qu'en raison de la sécheresse, tous les verts de betteraves ont été consommés et que tout l'azote contenu dans la production a été, en fait, sorti du champ.

Donc, pratiquement, l'exportation a été plus forte que celle du champ normal dans lequel les verts ne servent pas à l'alimentation animale.

La différence pour les cultures suivantes n'a pu donc résulter que :

1° d'une part, d'une minéralisation peut-être plus importante de l'azote organique du sol en année sèche.

2° d'autre part , d'une présentation différente de cet azote.

Dans un cas, il se trouve sous forme organique dans les verts et, dans l'autre, sous forme minérale. Cela se traduit par une modification de l'époque et de la facilité d'utilisation, mais il ne semble pas que l'on doive compter des bilans azotés très différents (dans le cas où les verts sont enfouis en année humide). Au contraire si les verts sont consommés, l'exportation est doublée et on ne peut alors aucunement comparer les bilans.

Cette comparaison, en théorie, aurait du pouvoir servir à mesurer l'influence de la présentation de l'azote, soit sous forme minérale, soit après transformation par un végétal, sur le rendement des cultures suivantes. En fait cela a été impossible car la sécheresse du sol était telle en 59 que sa réimbibition a absorbé toutes les pluies d'hiver, éliminant ainsi tout risque de pertes en profondeur.

B — *Potassium.*

a) *Teneur par rapport à la matière sèche*, schéma 7, graphique 7. — Contrairement à l'azote, les racines normales sont un peu plus riches en potasse que celles de l'année 59, et les feuilles sont elles très nettement plus riches.

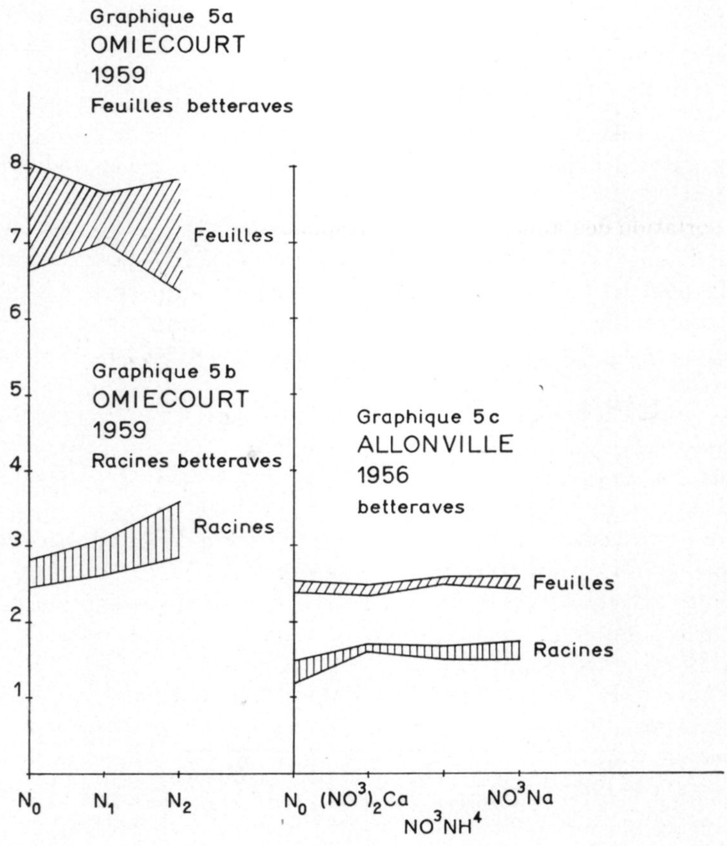
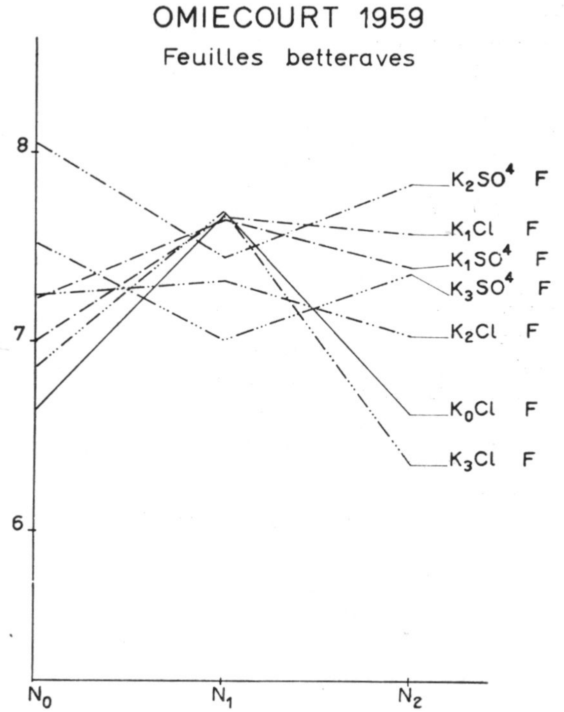
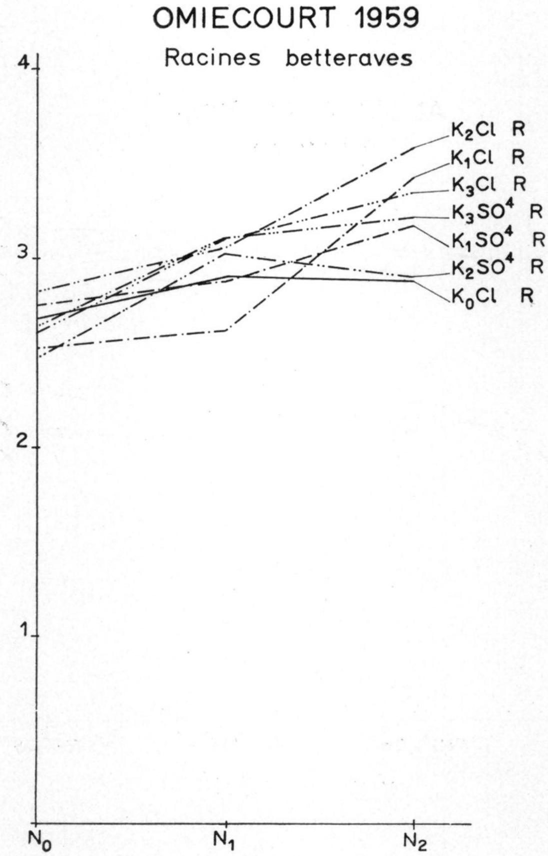


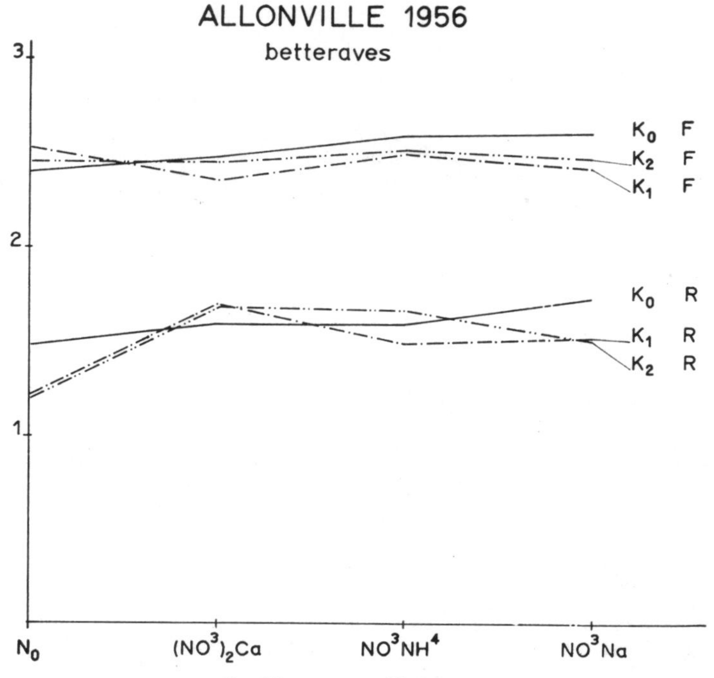
Schéma 5. — N ‰ vert.



Graphique 5 a. — N‰ vert.



Graphique 5 b. — N ‰ vert.



Graphique 5 c. — N ‰ vert.

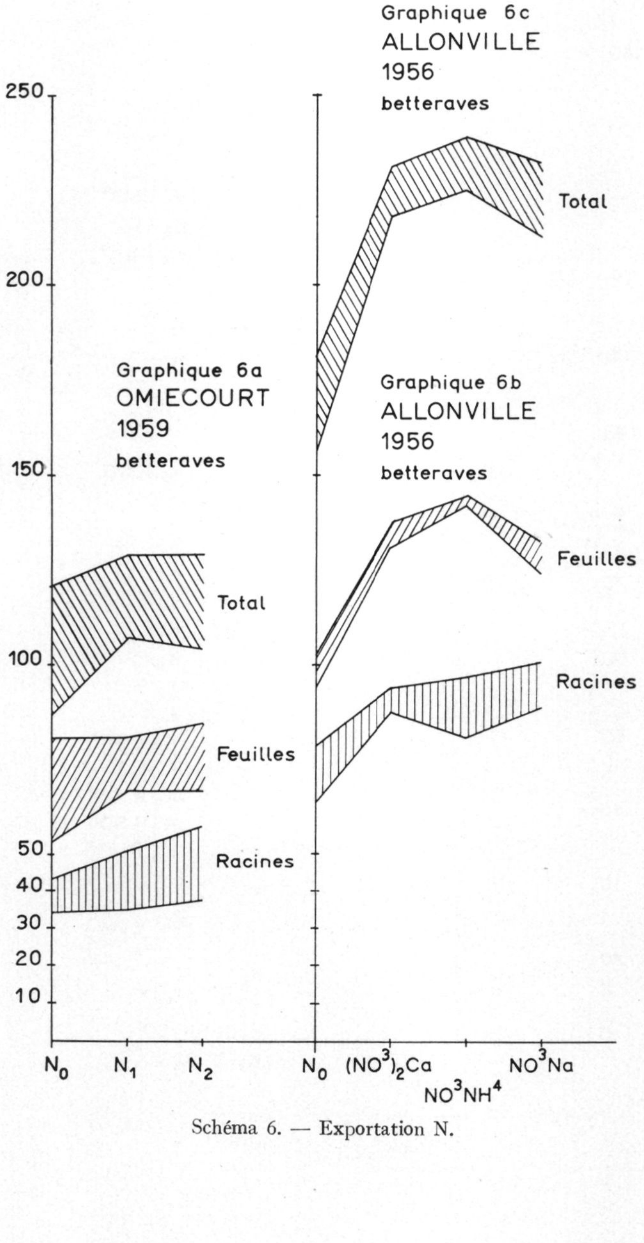
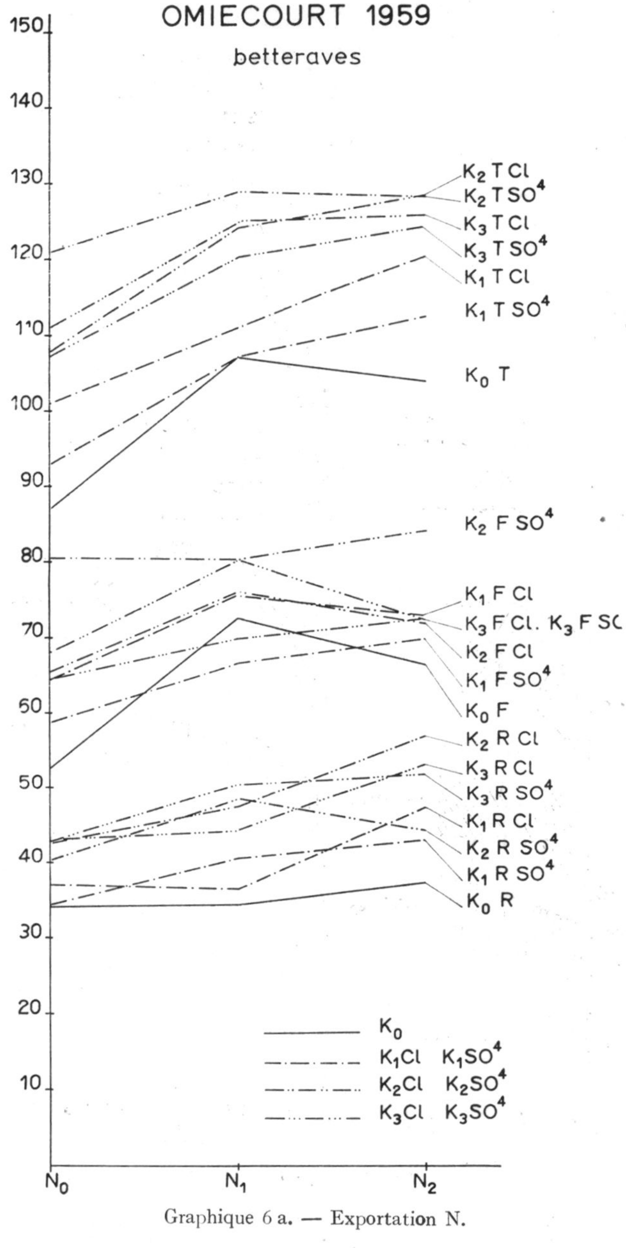
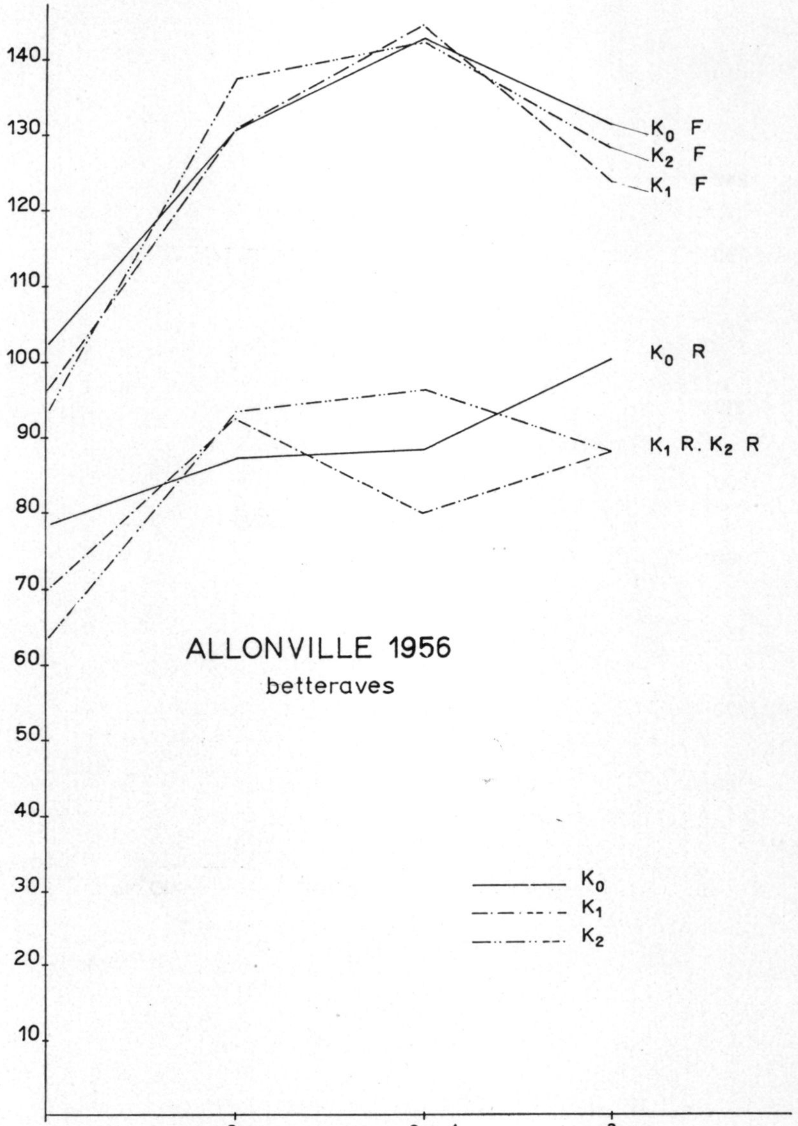


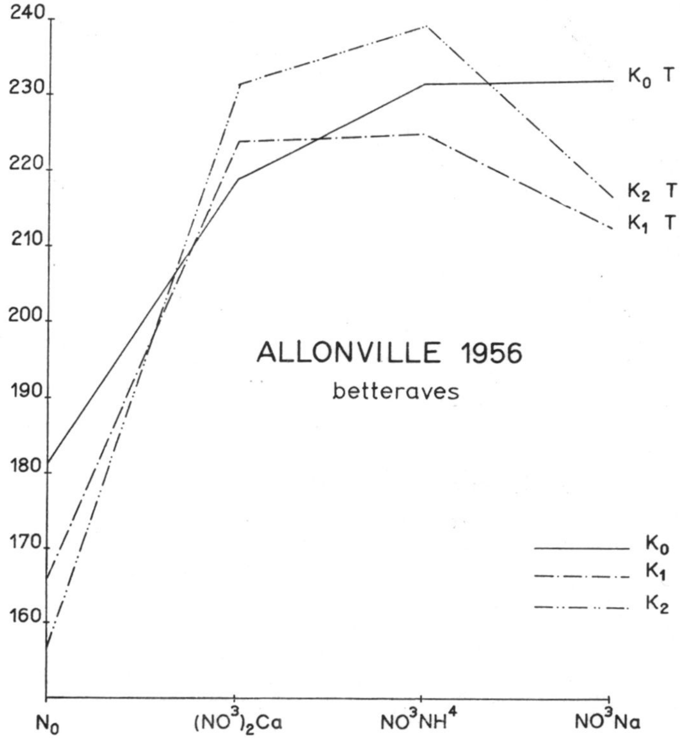
Schéma 6. — Exportation N.



Graphique 6 a. — Exportation N.



Graphique 6 b. — Exportation N.



Graphique 6 c. — Exportation N.

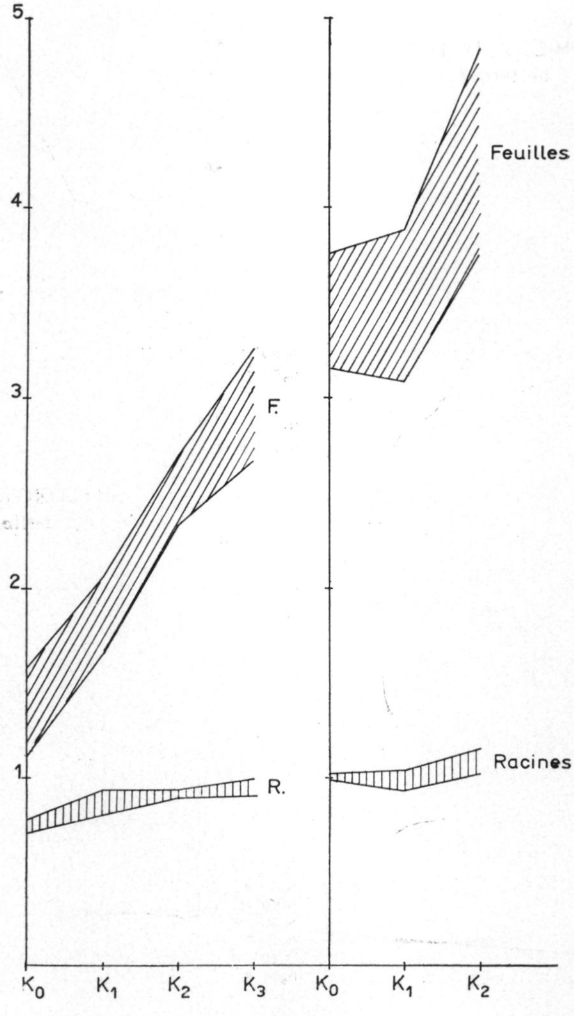
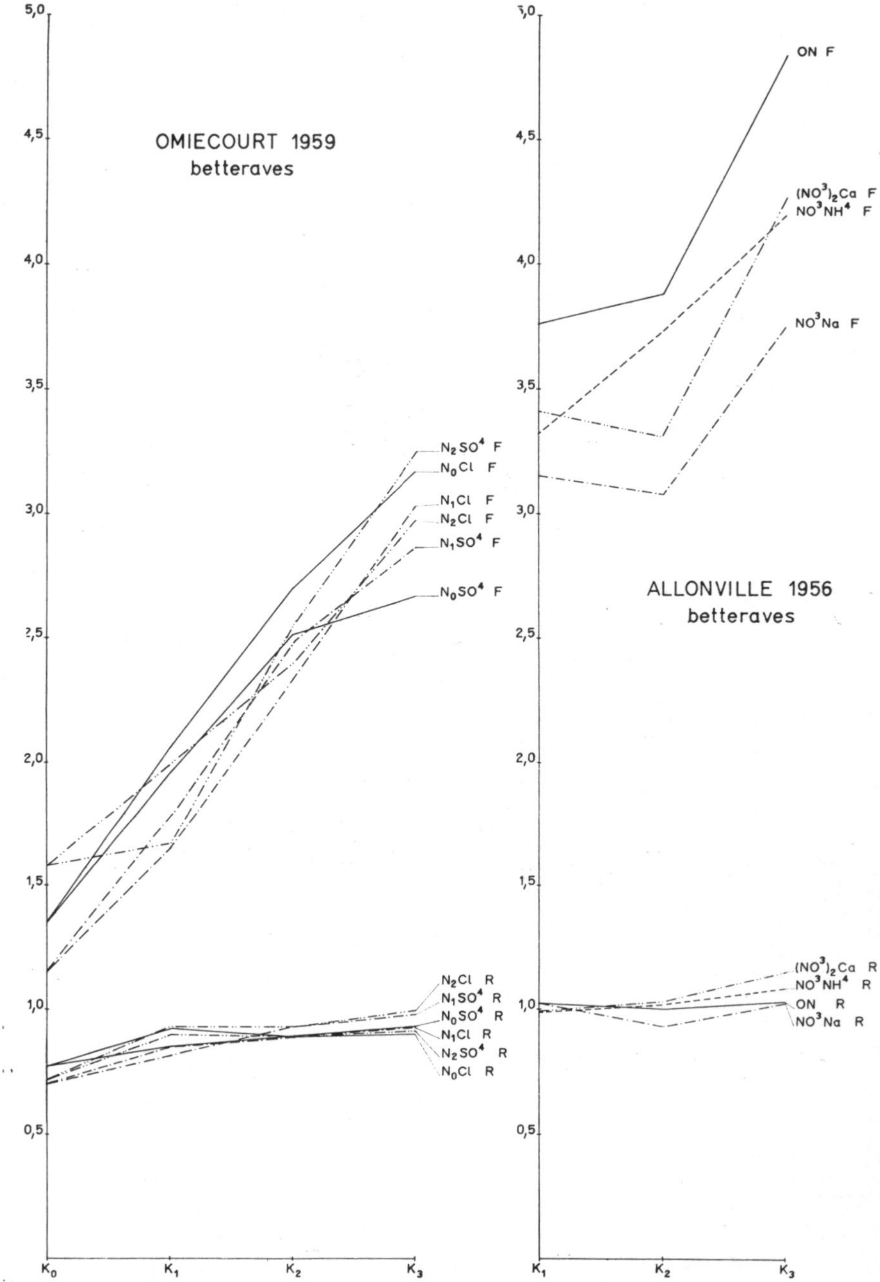


Schéma 7. — K_2O % sec.



Graphique 7. — K_2O % sec.

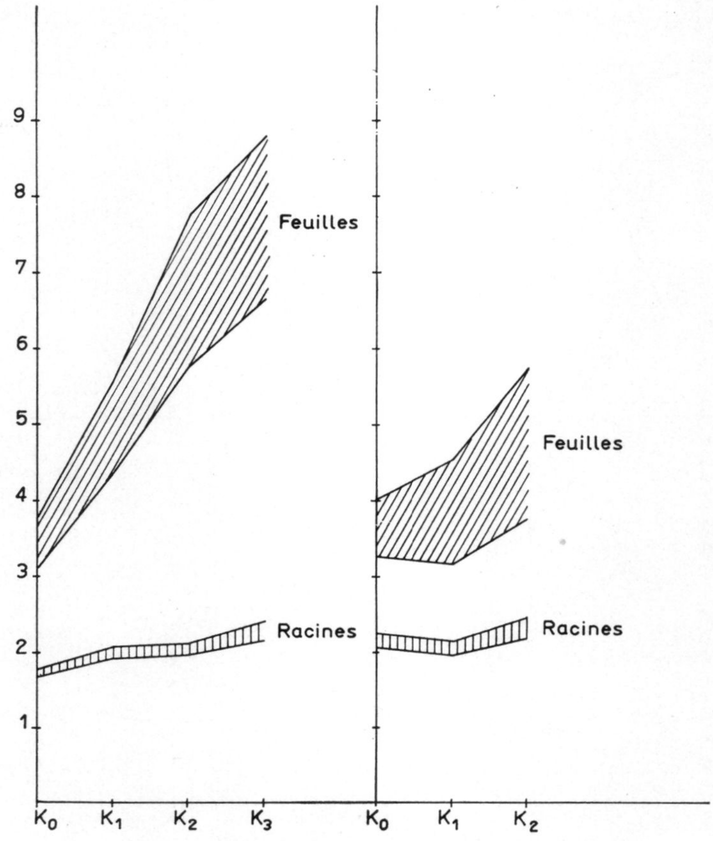
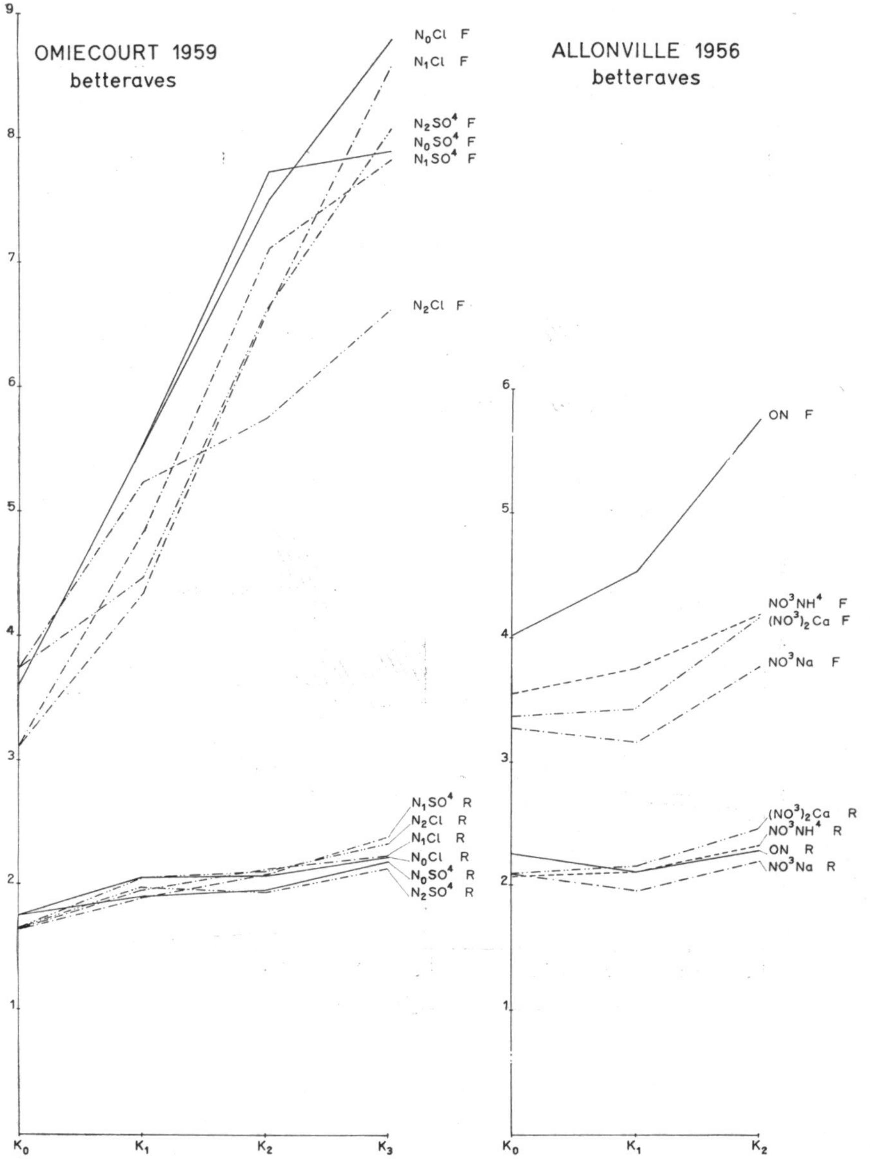


Schéma 8. — K_2O ‰ vert.



Graphique 8. — K_2O ‰ vert.

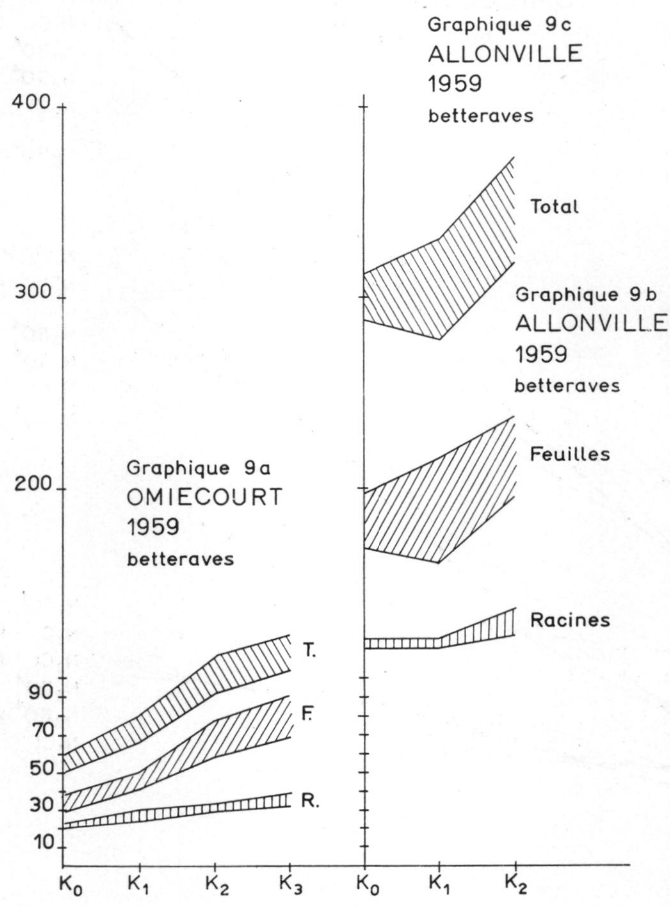
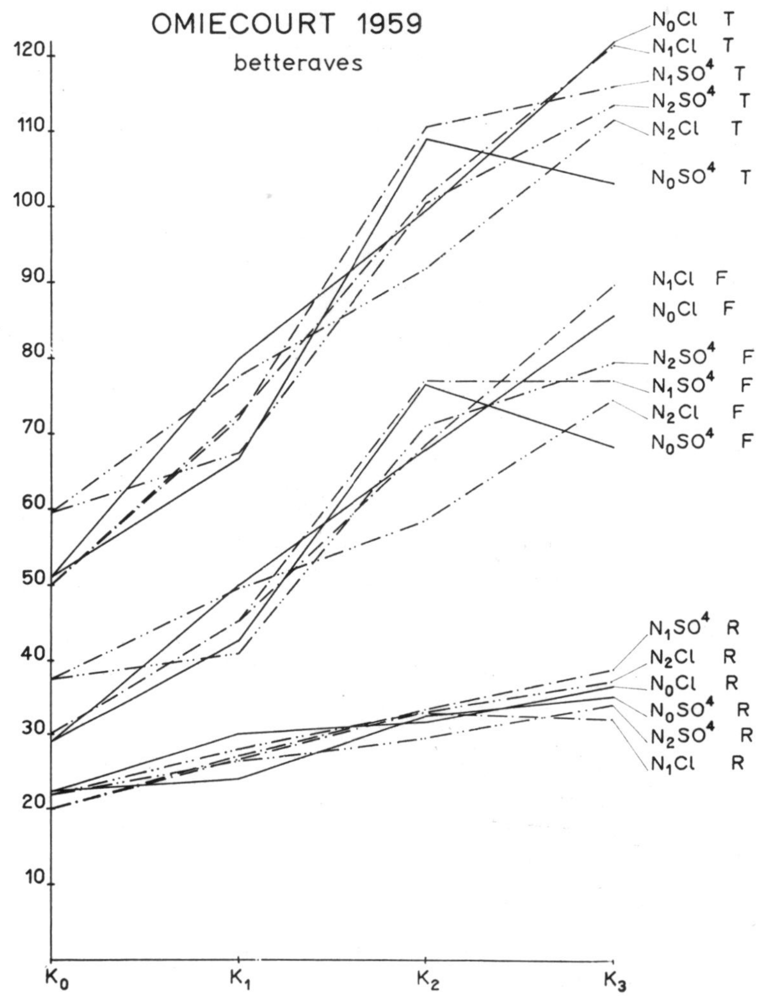
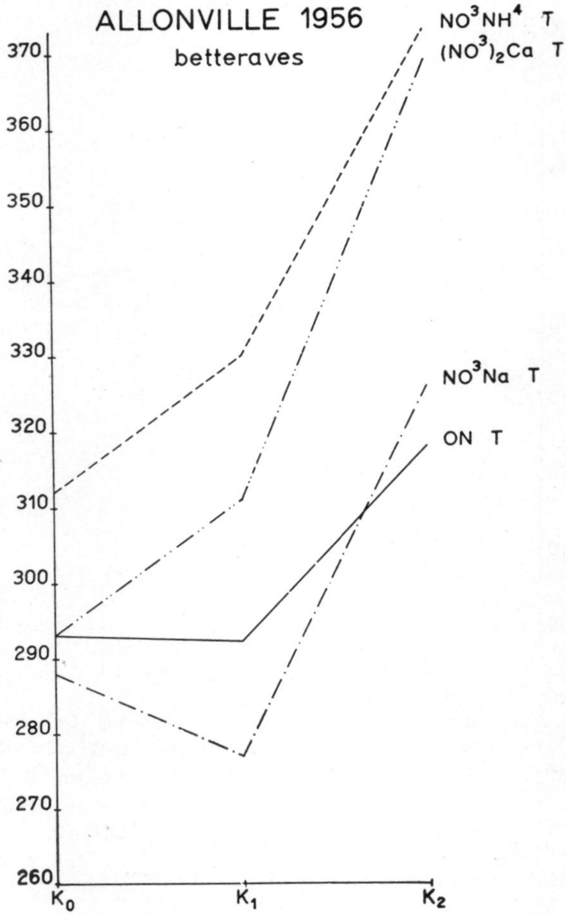


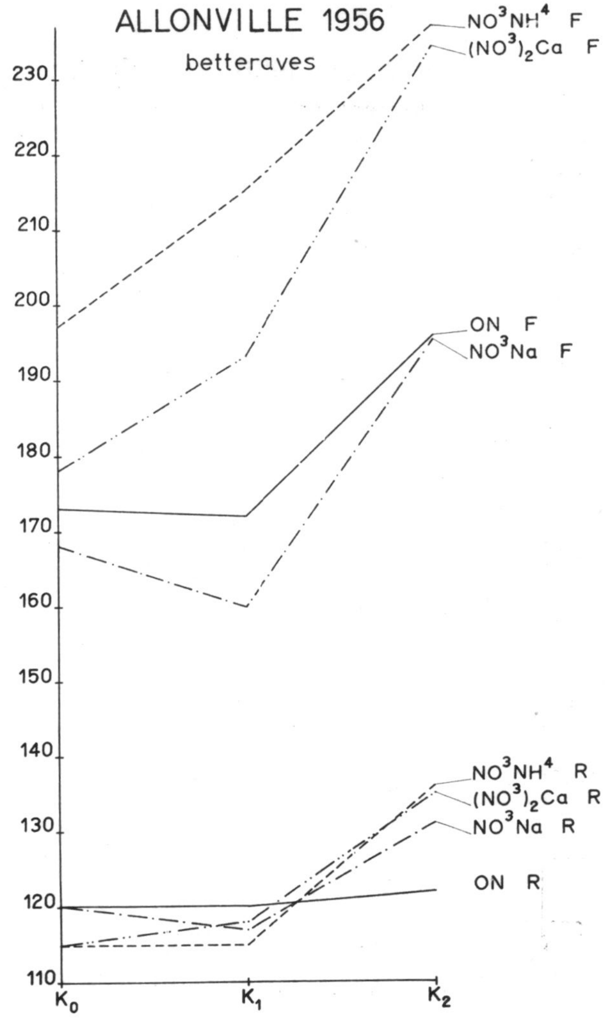
Schéma 9. — Exportation K_2O.



Graphique 9 a. — Exportation Ha K_2O



Graphique 9 b. — Exportation Ha K_2O



Graphique 9 c. — Exportation K_2O.

L'action des doses d'engrais est très marquée à Omiécourt et ne se manifeste à Allonville que pour la dose la plus forte. Les teneurs des racines sont peu variables.

L'analyse minérale, exprimée généralement en pour cent sec, ne fait donc pas ressortir de teneurs anormales en potasse des verts recueillis en année sèche. Elles paraissent au contraire faibles.

b) *Teneur exprimée en vert* (schéma 8 graphique 8). — Si l'on passe à la matière verte, la richesse des racines varie peu d'une année à l'autre, tandis que celle des verts peut prendre des valeurs doubles des valeurs normales. Dans ces conditions la fumure potassique prend une valeur considérable puisqu'elle peut faire varier le pourcentage de potasse du simple au triple (3 à 9 p. 1000).

c) *Exportation* (schéma 9 graphiques 9a, 9b, 9c). — Malgré cette grande fluctuation des richesses, l'exportation totale de l'année sèche reste faible et inférieure, au maximum, à celle effectuée par les racines en année humide. On doit relever cependant des variations considérables en fonction de la fumure (de 50 à 120 kg/Ha).

En ce qui concerne l'arrière action des fumures potassiques non utilisées, on pourrait reprendre les mêmes observations que pour l'azote bien que les mécanismes d'action soient très différents.

Si les verts sont habituellement exportés, et que l'on en tienne compte, il parait qu'à la suite de l'année sèche, la fumure potassique de l'année suivante aurait pu être nettement diminuée.

Dans le cas où les verts sont restitués, la situation rejoint celle exposée précédemment, puisque l'exportation totale de l'année sèche a été au plus égale à celle des racines seules en année normale.

CONCLUSION

Ces résultats constituent avant tout des observations permettant de répondre aux questions qui ont été posées à la suite de la sécheresse, de 59. Il s'agissait principalement de savoir, comme nous l'avons signalé en commençant, quelles pouvaient être les conséquences de cette sécheresse sur les exportations azotées et potassiques tant en ce qui concerne la richesse des verts que les restitutions ou les exportations qu'elles représentaient.

SUMMARY

COMPARISON OF NITROGEN AND POTASSIUM LEVELS IN SUGAR BEET GROWN IN DRY AND WET YEARS

Fertilizer experiments involving nitrogen and potassium were used to estimate the effect of extreme climatic conditions, in two different years, on the production and mineral composition of the green and dry matter of sugar bett.

The variations observed may habe profound effects on the nutrition of animals fed with the crop, and on the management of mineral soils.

ZUSAMMENFASSUNG

VERGLEICH DEINER STICKSTOFF-UND KALIAUSFUHR DURCH EINEN ZUCKERRUBENANBAU IN TROCKENEM UND FEUCHTEM JAHRGANG

Durch Zuhilfenahme von bestehenden Stickstoff-und Kalidüngerversuchsfelder, konnte jeweils die Produktion sowie die minerale Zusammensetzung der grünen sowie der Trockensubstanz, bei äussersten klimatischen Bedingungen verschiedener Jahrgänge, gemessen werden.

Die beobachteten Veränderungen erlauben es, die einerseits auf die Ernährung der Tiere welchen man Pflanzenteile verabreicht, andererseits die auf den mineralen Nährstoffgehalt des Bodens entstehenden Rückwirkungen, zu werten.

Сравнение поглощения азота и поташа культурой сахарной свеклы в засушливый год и в год влажсный.

Ги ЛЕФЭВР (Амьен).

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

При помощи опытов азотного и калийного удобрения, можно было определить влияние крайних климатических условий, в течение различных лет, на продукцию и на минеральный состав, вычисленные на сырое вещество и на сухое вещество сахарной свеклы.

Установленные колебания позволяют предвидеть роль, которую они могли бы иметь с одной стороны на питание животных, которым растительные части могли бы быть даны, и, с другой стороны, на минеральный режим почвы.

Ann. agron., 1961, **12** (3), 365-382

633. 264 : 631 84

RÉSULTATS COMPARÉS DE DEUX ANNÉES D'EXPÉRIENCE DE FUMURE AZOTÉE SUR FÉTUQUE

G. LEFEVRE et G. HIROUX
Avec la collaboration technique de Yvette CAILLOUET et Nicole BRACQUART.
Station d'Agronomie, Amiens.

SOMMAIRE

La succession de deux années, ayant connu des conditions climatiques très différentes, a permis de réaliser des comparaisons sur le comportement d'une prairie temporaire de Fétuque et de mettre en évidence des caractères communs.

La production en vert, bien que répartie différemment, a atteint, les deux années, la même valeur et on a pu noter des réponses identiques à la fumure azotée, notamment en ce qui concerne l'effet maximum obtenu et le manque d'arrière action des fumures antérieures.

La production de matière sèche reflète les conditions exceptionnelles de la sécheresse de 1959. On note toutefois, les deux années, une relation entre l'efficacité de la fumure azotée et l'augmentation de la teneur en eau du végétal.

L'action de l'azote, enfin, a été étudiée sur la production, la richesse du végétal et la quantité exportée par les parties aériennes. Il ressort une corrélation très nette entre la quantité totale de matière verte produite au cours des divers cycles végétatifs et la quantité totale d'azote contenu dans les parties aériennes.

Une première année d'expérience de fumure azotée sur Fétuque, réalisée en 1959, a été présentée dans les comptes rendus annuels des travaux des Stations Agronomiques. Elle faisait ressortir principalement une influence directe du dernier apport d'azote sur le rendement de la coupe le succédant immédiatement, sans que l'on puisse noter un très grand effet d'arrière-action. Les résultats de cet essai sont repris ici afin de les comparer à ceux obtenus en 1960 avec des données climatiques bien différentes.

SCHÉMA EXPÉRIMENTAL ET CONDITIONS CLIMATIQUES

Les doses apportées en 1959 paraissaient convenables et nous avons repris en 1960 le même schéma général d'application. Partant d'un dispositif comprenant une parcelle non traitée et une parcelle recevant 40 unités/ha d'azote (sous forme d'Ammonitrate), chaque parcelle, au cours des coupes

successives, était chaque fois divisée en deux, une partie n'étant pas refumée, l'autre recevant soit 30 unités d'azote, si elle avait déjà reçu précédemment 40 unités, soit 40 unités, si elle provenait d'une partie n'ayant pas reçu d'engrais. En 1959, il y avait eu trois coupes, mais en 1960 il a pu en être fait quatre, déterminant ainsi le plan suivant :

Départ de végétation	Après 1re coupe	Après 2e coupe	Total 1959 3 coupes	Après 3e coupe	Total 1960 4 coupes
0	0	0	0	0	0
				40	40
		40	40	0	40
				30	70
	40	0	40	0	40
				30	70
		30	70	0	70
				30	100
40	0	0	40	0	40
				30	70
		30	70	0	70
				30	100
	40	0	70	0	70
				30	100
		30	100	0	100
				30	130

Les dates de coupe ont été les suivantes :

		1959	1960
1re Coupe		20 mai	16 mai
2e Coupe	avec azote	7 juillet	27 juin
	sans azote	23 juillet	
3e Coupe	avec azote	2 septembre	23 août
	sans azote	6 octobre	
4e Coupe			12 janvier

La quatrième pousse de 1960 a été conservée sur pied et la coupe a été réalisée assez tard en hiver quand la pluviométrie l'a permise.

Les parcelles fumées ou non, ont été récoltées ensemble en 1960, car la pousse était partout suffisante pour permettre une exploitation. Les différences climatiques se font sentir dans les dates de coupe puisque, par rapport aux parcelles les plus précoces de 1959, celles de 1960 ont une avance d'au moins 10 jours aux mois de juin et d'août.

La comparaison de ces conditions climatiques peut se faire dans le tableau 1. Les pluies sont celles de Fienvillers où l'essai a été réalisé, chez M. DELESPIERRE avec le concours de M. VASSE, conseiller technique de la Chambre d'Agriculture et de M. KUHN ingénieur du S. P. I. E. A. Nous les remercions bien vivement de leur collaboration.

Les températures moyennes sont celles d'Amiens.

Les différences apparaissent nettement à partir de Mai pour les pluies et de Juin pour les températures. Les pluies de 1960 n'ont pas été très importantes au début de l'année et le printemps a

été plutôt sec. Mais en juillet et août la pluviométrie a été plus abondante que celle de la moyenne sur 25 ans, alors qu'en 1959 c'était la période de sécheresse, peut-être un peu moins marquée dans cette partie du département normalement très pluvieuse.

	Pluies		Températures moyennes	
	1959	1960	1959	1960
	—	—	—	—
Janvier	100,7	52,1	1,93	4,26
Février	2,0	45,4	3,08	4,91
Mars	59,2	80,9	8,79	7,76
Avril	53,2	19,9	11,07	10,05
Mai	30,5	58,7	14,81	14,79
Juin	21,3	50,1	17,38	15,48
Juillet	33,1	92,6	20,13	16,80
Août	40,9	108,8	19,12	17,32
Septembre	5,5	52,3	17,18	14,73
Octobre	71,9	136,5	12,50	11,40
Novembre	68,6	142,0	6,79	9,19
Décembre	91,6	62,9	5,99	3,83

L'expérience a été menée en 1960 sur une autre partie du champ de Fétuque Mommerstag, suivi en 1959. Cette fétuque a donc une année de plus, soit la troisième de son exploitation. Elle avait aussi supporté la sécheresse de 1959.

RÉSULTATS

Matière verte (graph. 1, tableau 1).

Les résultats frappent dès la première coupe :

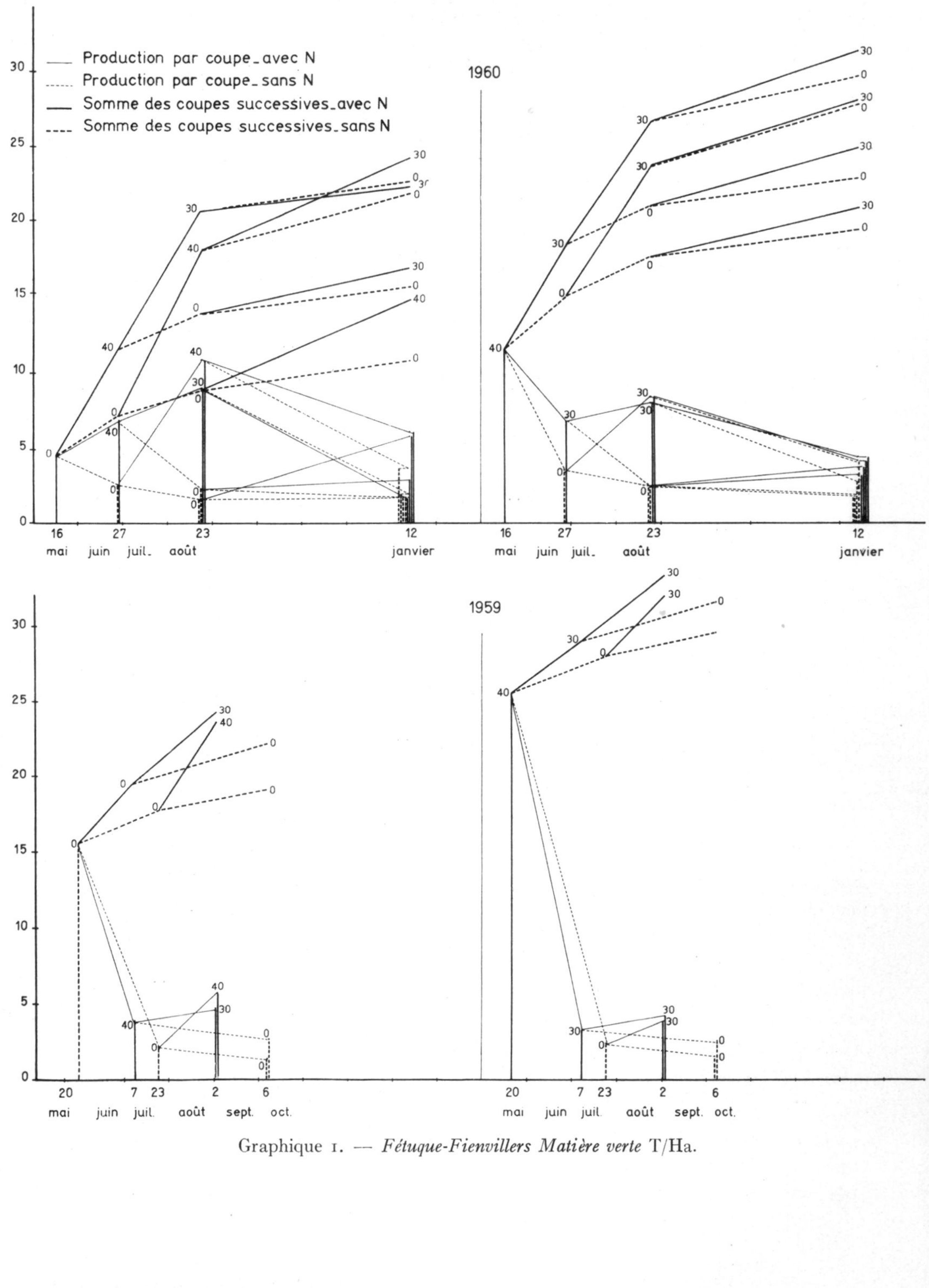
	1959	1960
	—	—
Sans azote	15,6 T/Ha	4,59 T/Ha
Avec azote 40 unités/ha	25,74 T/Ha	11,57 T/Ha

La parcelle témoin, de 1959, dépasse largement la parcelle fumée, de 1960. L'apport d'azote se traduit par une production supplémentaire de plus de 10 tonnes dans un cas et 7 tonnes dans l'autre.

Ces premiers chiffres montrent que si l'action de l'azote est tout aussi évidente les deux années (relativement elle l'est même plus en 1960), le rendement total est assuré par des facteurs sur lesquels on peut difficilement agir. Les températures ne peuvent être mises en cause. En fait, en 1960, on a observé l'arrière effet du déficit hydrique de 1959.

Pour les deuxièmes coupes, la situation s'inverse. En 1959, la sécheresse commence à se faire sentir, alors qu'en 1960, les fortes pluies de juillet son favorables.

	0-0	40-0
	—	—
Les parcelles sans azote font en 1959	2,24 T	2,37 T
« » en 1960	2,65 T	3,56 T
	0-40	**40-30**
	—	—
Les parcelles avec azote font en 1959	3,94 T	3,36 T
« » en 1960	6,94 T	6,95 T



Graphique 1. — *Fétuque-Fienvillers Matière verte* T/Ha.

On trouve, les deux ans, une faible arrière action de la fumure antérieure sur les parcelles sans complément azoté (0.13 et 0.91) arrière action disparaissant quand un nouvel apport précède juste le développement d'un nouveau cycle de végétation.

En 1959, l'apport d'azote fournit des suppléments de 1t à 1t7 suivant les cas; en 1960, 3,4 et 4,3 tonnes.

Pour la troisième coupe, l'effet maximum de l'azote (0-0-0 — 0-0-40) est de 4,4 T en 1959 et de plus de 9T. en 1960.

Enfin pour la quatrième coupe l'augmentation maximum est de 4 T/ha.

TABLEAU I

Matière verte T/Ha.

Doses d'azote				1959					1960							
1re Coupe	2e Coupe	3e Coupe	4e Coupe	1re Coupe	2e Coupe	1 + 2	3e Coupe	1 + 2 + 3	1re Coupe	2e Coupe	1 + 2	3e Coupe	1 + 2 + 3	4e Coupe	1 + 2 +3+4	
0	0	0	0	15,6	2,24	*17,84*	1,38	*19,22*	4,59	2,65	*7,24*	1,68	*8,92*	1,88	*10,80*	
			40											5,88	*14,80*	
		40	0				5,80	*23,64*				10,85	*18,09*	3,76	*21,85*	
			30											6,16	*24,25*	
	40	0	0		3,94	*19,54*	2,78	*22,32*		6,94	*11,54*	2,36	*13,89*	1,88	*15,77*	
			30											3,00	*16,89*	
		30	0				4,76	*24,30*				9,03	*20,57*	2,08	*22,65*	
			30											1,72	*22,29*	
40	0	0	0	25,74	2,37	*28,11*	1,60	*29,71*	11,57	3,56	*15,12*	2,55	*17,67*	1,88	*19,55*	
			30											3,28	*20,95*	
		30	0				4,02	*32,13*				8,50	*23,62*	4,20	*27,82*	
			30											4,28	*27,96*	
	30	0	0		3,36	*29,10*	2,58	*31,68*		6,94	*18,51*	2,55	*21,06*	1,96	*23,02*	
			30											3,88	*24,94*	
		30	0				4,32	*33,42*				8,10	*26,61*	2,96	*29,57*	
			30											4,52	*31,23*	

La comparaison de ces deux années montre donc qu'avec des conditions climatiques favorables, un apport de 40 unités d'azote peut se traduire par un accroissement de production de 9 ou 10 T/ha d'herbe, (en partant de 1,7 T (3e coupe 1960) ou de 15 T (1re coupe 1959)). Mais on ne peut, en fait, prévoir les conditions qui feront rentabiliser ainsi la fumure au maximum. C'est pourquoi le schéma, auquel

nous avons abouti, semble être de nature à utiliser les possibilités quand elles se présentent. Évidemment, cette fumure doit encore être adaptée, lorsqu'au lieu de pratiquer exclusivement la fauche, comme dans notre cas, les prairies sont pâturées. Mais ces résultats montrent, également, qu'en exploitation herbagère, on ne peut pas déduire du faible développement d'une des pousses, que l'azote antérieurement apporté n'a pas été utilisé. Il marque peu sur les exploitations ultérieures, quelle que soit la production antérieure qu'il a fournie. Ceci est bien mis en évidence sur le graphique où toutes les parcelles avec azote sont groupées ainsi que les parcelles sans azote, l'effet de la fumure précédente étant quelquefois un peu plus marqué lorsque l'apport est arrêté. En présence d'une nouvelle fumure, au contraire, l'effet peut être négatif, nul, ou positif.

Si l'on compare les productions totales, il est remarquable de noter que 1959 a, en fait, produit en moyenne plus d'herbe que 1960 (comptant cependant une coupe de plus). Les maxima sont en fait voisins, 31 T et 33 T. Les minima varient du simple au double : 10,8 T et 19 T. Peut-on en conclure qu'il serait possible de compter sur une production globale de 30 T à condition de faire en sorte que les possibilités de développement soient utilisées à n'importe quel moment de l'année ? Si l'on raisonne sur le potentiel total de production on voit ainsi qu'il peut être dangereux de vouloir pousser la production à un moment donné, car l'on risque de passer l'époque où l'effet de l'engrais est le plus payant. Nous penserions donc qu'il est préférable d'essayer de faire produire le maximum à chaque coupe ou passage, quitte à adapter un plan de conservation si, à un moment donné, la production est trop forte. Il ne faut pas perdre l'occasion de faire produire 10 tonnes d'herbe à 40 kg d'azote.

Cela peut se vérifier encore en comparant la production totale des trois premières coupes (puisque 1959 n'a eu que trois coupes), des deux années, en fonction d'une part de la dose totale d'azote apportée, et en déduisant d'autre part la production du témoin sans azote. On obtient ainsi le tableau suivant :

Traitements		1959 t/ha	1960 t/ha
40	0- 0-40	4,42	9,17
	0-40- 0	3,10	4,97
	40- 0- 0	10,49	8,75
70	0-40-30	5,08	11,65
	40- 0-30	12,91	14,70
	40-30- 0	12,46	12,14
100 :	40-30-30	14,20	17,69

— Pour 40 kg. — En 1959, la fumure fournie au départ de végétation détermine nettement la meilleure réponse. En 1960, son influence serait très comparable à celle du traitement 0-0-40. Le moins bon effet est obtenu dans les deux cas par le 0-40-0.

— Pour 70 kg. — En 1960, les résultats sont bien groupés, indiquant une production assez régulière des différents cycles. Ils sont tous supérieurs à ceux obtenus avec 40 unités. En 1959 on cumule à la 2e coupe l'effet important des 40 unités sur le premier cycle de végétation, les fumures ultérieures ne permettant pas de rattraper le retard, les conditions climatiques s'y opposant. Ainsi le 0-40-30 est nettement plus faible que le 40-0-30 ou que 40-30-0.

— Pour 100 kg. — Cela représente, dans notre essai, une fumure avant tous les cycles. Elle se différencie pour les deux années de tous les autres traitements

Matière sèche

Teneur en matière sèche pour cent du produit vert (tableau 2).

Les remarques sur cette teneur peuvent être faites sur les valeurs absolues et sur les valeurs relatives.

La rigueur de la sécheresse de 1959 se manifeste dans des pourcentages de matière sèche dépassant 50. Des chiffres de ce genre ne se rencontrent pas fréquemment.

TABLEAU 2

Matiére séehe % vert

Doses d'azote				1959			1960			
1re Coupe	2e Coupe	3e Coupe	4e Coupe	1re Coupe	2e Coupe	3e Coupe	1re Coupe	2e Coupe	3e Coupe	4e Coupe
0	0	0	0	21,52	52,1	50,0	21,65	29,0	24,44	28,5
			40							25,9
		40	0			33,6			20,54	25,1
			30							24,7
	40	0	0		38,7	46,6		25,80	27,28	27,6
			30							25,4
		30	0			38,9			23,71	26,7
			30							31,1
40	0	0	0	19,69	40,1	50,5	19,94	27,10	26,90	29,9
			30							28,8
		30	0			36,6			22,60	27,9
			30							26,0
	30	0	0		38,4	50,8		26,90	27,43	28,1
			30							28,6
		30	0			37,5			22,35	28,1
			30							28,5

En année plus normale comme 1960, où, au contraire, les sols étaient de plus en plus arrosés à mesure qu'on avançait dans l'année, il semble, cependant, ressortir une tendance faisant augmenter la richesse en matière sèche, à mesure que le rang du cycle végétatif augmente.

Si l'on passe aux valeurs relatives on note une influence très nette de la fumure azotée. Les parcelles azotées sont en effet toujours plus riches en eau et l'on peut presque dire que la différence suit l'importance de l'effet de l'azote.

En 1959, en 3e coupe :

	Différence de rendement en vert	Différence de teneur en matière sèche
0- 0- 0 0- 0-40	4 t 42	50,0 — 33,6 = 16,4
0-40- 0 0-40-30	1 t 98	46,6 — 38,9 = 7,7
40- 0- 0 40- 0-30	2 t 42	50,5 — 36,6 = 13,9
40-30- 0 40-30-30	1 t 74	50,8 — 37,5 = 13,3

En 1960, en 2e coupe, la fumure azotée se traduit par une différence dans les pourcentages allant de 3,5 à 4,1 sur 25 p. 100. Soit de 12 à 15 p. 100 en valeur relative.

TABLEAU 3

Matière sèche T/Ha

Doses d'azote				1959					1960						
1re Coupe	2e Coupe	3e Coupe	4e Coupe	1re Coupe	2e Coupe	1 + 2	3e Coupe	1 + 2 + 3	1re Coupe	2e Coupe	1 + 2	3e Coupe	1 + 2 + 3	4e Coupe	1 + 2 +3+4
0	0	0	0	3,357	1,167	*4,624*	0,690	*5,214*	0,994	0,768	*1,762*	0,411	*2,173*	0,536	*2,709*
			40											1,523	*3,696*
		40	0				1,950	*6,474*				2,228	*3,999*	0,944	*4,934*
			30											1,521	*5,511*
	40	0	0		1,524	*4,881*	1,295	*6,176*		1,792	*2,786*	0,643	*3,429*	0,519	*3,948*
			30											0,762	*4,191*
		30	0				1,850	*6,731*				2,141	*4,927*	0,555	*5,482*
			30											0,535	*5,462*
40	0	0	0	5,068	0,951	*6,019*	0,808	*6,827*	2,306	0,964	*3,270*	0,686	*3,956*	0,562	*4,518*
			30											0,945	*4,901*
		30	0				1,470	*7,489*				1,921	*5,191*	1,172	*6,363*
			30											1,112	*6,303*
	30	0	0		1,290	*6,358*	1,311	*7,669*		1,868	*4,174*	0,700	*4,874*	0,551	*5,425*
			30											1,109	*5,983*
		30	0				1,620	*7,978*				1,810	*5,984*	0,832	*6,816*
			30											1,302	*7,286*

Tonnage sec hectare (tableau 3, graph. 2).

Les variations considérables notées dans les teneurs en matières sèches peuvent parfois inverser les positions obtenues en comparant des poids verts :

Ex. en 1959 : 2e coupe.

Traitements	Vert	Sec
0-0	1,24	1,167
40-0	2,37	0,951

La production maximum, en une coupe, a été obtenu au début de la végétation, en 1959, avec 40 unités d'azote, soit 5 t,068. Cette production unique dépasse le tonnage obtenu avec quatre coupes en 1960 par 7 traitements sur 16. Ceci confirme la nécessité — dégagée précédemment — de fournir toujours une fumure azotée sur les coupes successives afin d'obtenir le maximum de rendement avec celle qui sera la plus favorisée.

Déduction faite du témoin sans azote, les suppléments de rendement en sec obtenus par l'apport d'engrais ont été les suivants, suivant la répartition dans le temps des fumures :

	1959	1960	
	En 3 coupes t/ha	En 3 coupes t/ha	En 4 coupes t/ha
40 unités	de 0,962 à 1,613	de 1,256 à 1,817	de 0,987 à 2,225
70 —	de 1,517 à 2,455	de 2,701 à 3,018	de 1,482 à 3,654
100 —	2,764	3,181	2,753 à 4,107
130 —	—	—	4,577
(Témoins)	(5 214)	(2 173)	(2 709)

Les suppléments de rendement en sec sont assez comparables pour ces deux années très différentes.

La production totale maximum est un peu plus faible au total en 1960 : 7 286 contre 7 978 en 1959 (diminution de l'ordre de 10 p. 100) alors que les témoins présentaient une différence de 48 p. 100 $\frac{(5\,214 - 2\,709)}{5\,214}$.

La fumure azotée a donc en partie permis d'uniformiser les résultats.

Azote

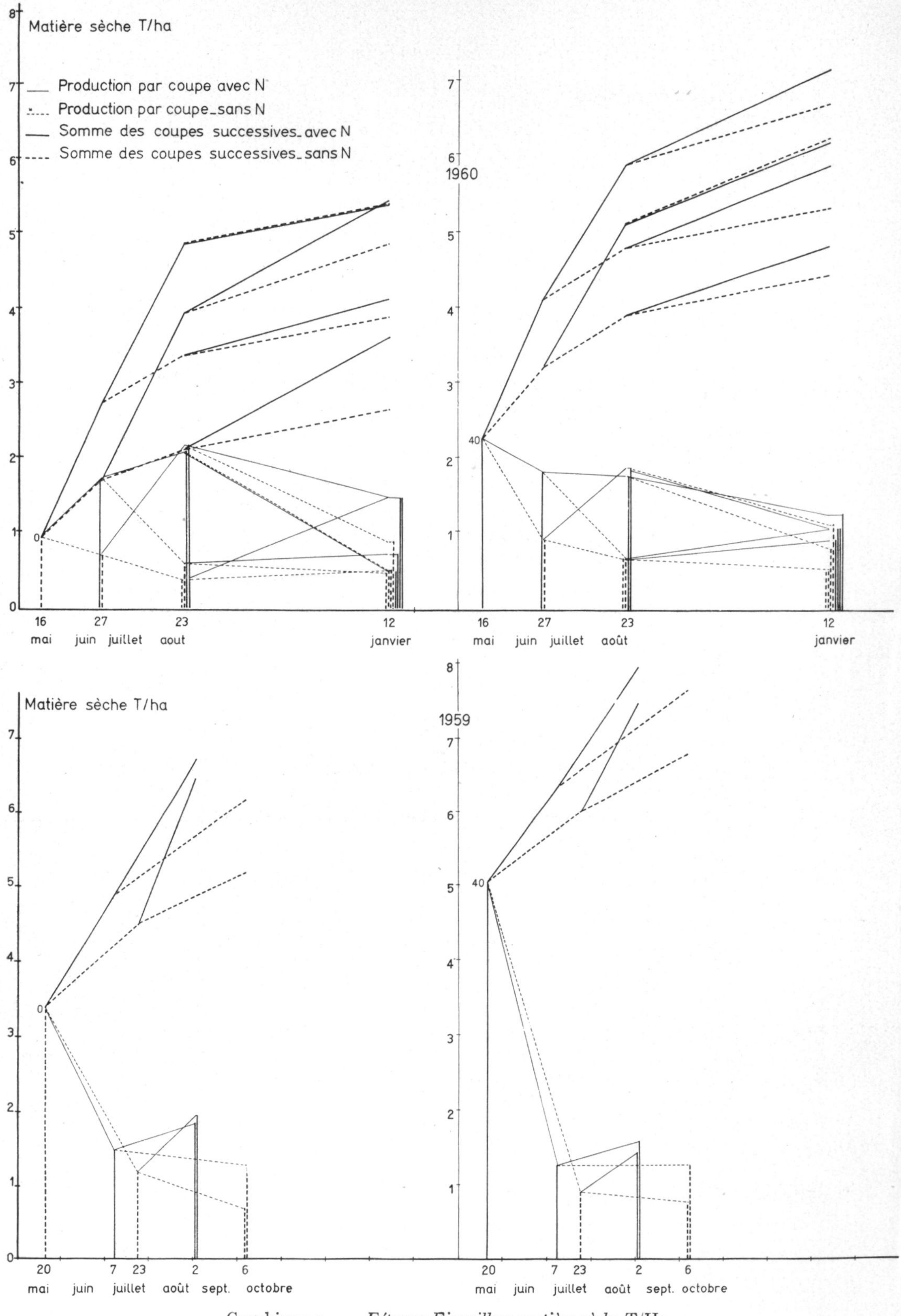
Il est remarquable de noter l'action de l'azote à travers son effet sur la teneur du végétal en vert ou en sec.

Pour cent vert (tableau 4).

En 1959 l'apport avant la première coupe se traduit par une augmentation de la teneur des parties aériennes. C'est le contraire en 1960.

Pour la deuxième coupe, situation inverse — tous les traitements azotés ont en 1959 une teneur moindre que le témoin et supérieure en 1960.

Troisième coupe : Influence diverse, les deux années, suivant les traitements. Notons toutefois que les parcelles les plus enrichies (100 unités) sont, pour les deux ans, moins riches en azote que les témoins (0-0-0).



Graphique 2. — *Fétuque-Fienvillers matière sèche* T/Ha.

En valeurs absolues, par suite des variations des teneurs en matière sèche, les deuxième et troisième coupes de 1959 sont nettement plus riches que celles de 1960

TABLEAU 4

Azote % Vert

Doses d'azote				1959			1960			
1ere Coupe	2e Coupe	3e Coupe	4e Coupe	1ere Coupe	2e Coupe	3e Coupe	1ere Coupe	2e Coupe	3e Coupe	4e Coupe
0	0	0	0	0,38	0,77	0,765	0,494	0,458	0,545	0,481
			40							0,474
		40	0			0,598			0,456	0,427
			30							0,439
	40	0	0		0,70	0,736		0,489	0,586	0,452
			30							0,477
		30	0			0,828			0,522	0,435
			30							0,479
40	0	0	0	0,41	0,67	0,772	0,465	0,547	0,594	0,523
			30							0,544
		30	0			0,800			0,504	0,505
			30							0,458
	30	0	0		0,73	0,772		0,519	0,584	0,494
			30							0,471
		30	0			0,742			0,525	0,483
			30							0,495

Ceci est également à retenir. Les bêtes consommant de l'herbe verte, *la teneur du végétal est plus liée à des facteurs climatiques qu'à la dose absolue d'azote apporté. La richesse des parties vertes est en effet fonction de la quantité totale d'herbe produite, de la réponse de la culture à cette fumure, de la richesse en eau.*

Pour cent sec (tableau 5).

Ce dernier facteur est bien mis en évidence lorsqu'on passe aux teneurs en sec. Par exemple, en deuxième coupe, les traitements 40-30 donnent :

	En sec	En vert
1959 ..	1,91	0,73
1960 ..	1,93	0,519

De même les teneurs en sec des deuxièmes et troisièmes coupes de 1959 et 1960 deviennent très comparables.

Les échantillons récoltés en troisième coupe sur les parcelles à 100 unités d'azote sont nettement plus riches que les témoins. En 1960 ce sont même les seuls.

Il semblerait que la comparaison de la teneur en sec d'une parcelle traitée avec le témoin pourrait être prise comme test du niveau d'efficacité de la fumure apportée.

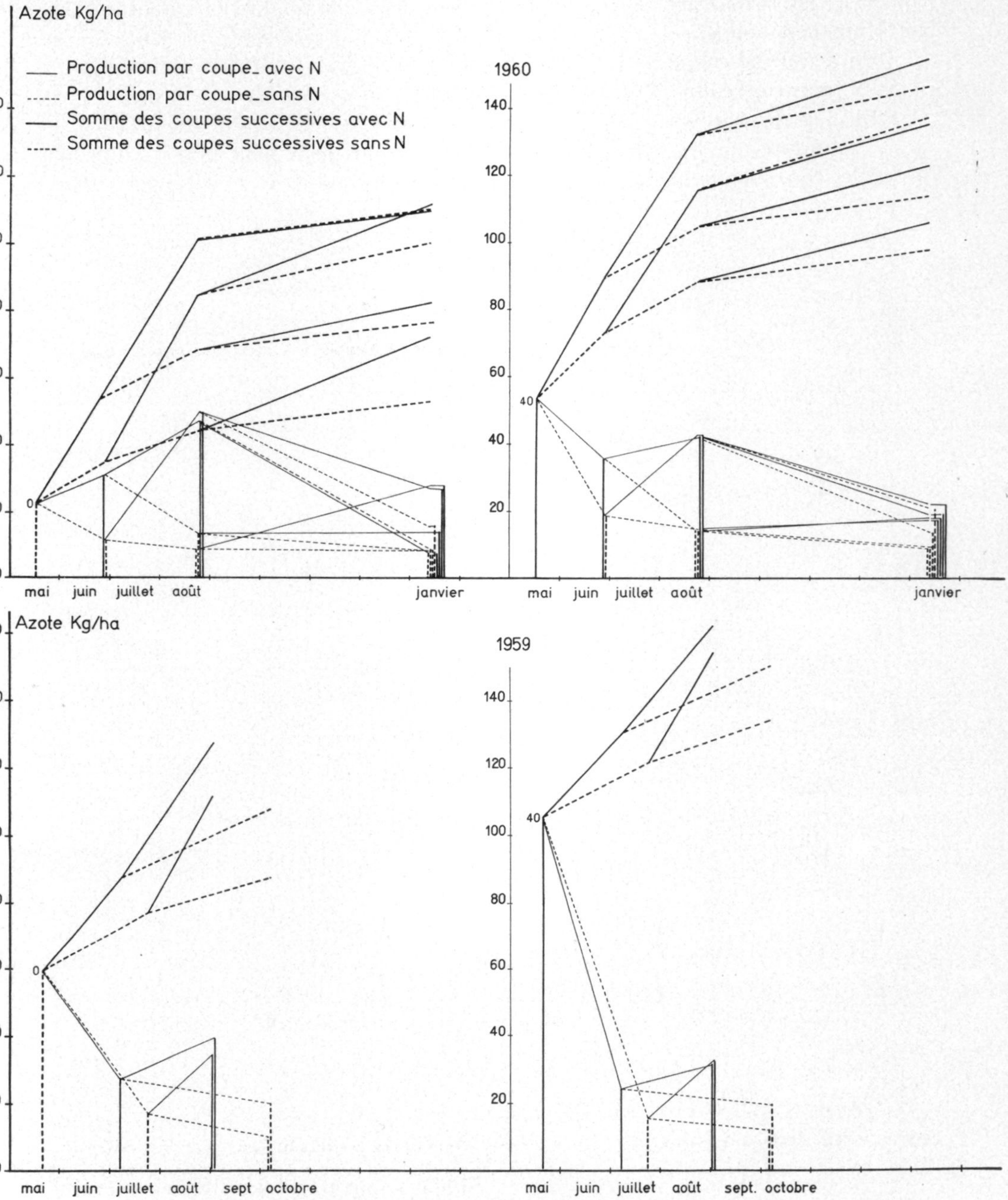
TABLEAU 5

Azote % sec

Doses d'azote				1959			1960			
1re Coupe	2e Coupe	3e Coupe	4e Coupe	1re Coupe	2e Coupe	3e Coupe	1re Coupe	2e Coupe	3e Coupe	4e Coupe
0	0	0	0	1,79	1,48	1,53	2,28	1,58	2,23	1,69
			40							1,83
		40	0			1,78			2,22	1,70
			30							1,78
	40	0	0		1,82	1,58		1,74	2,15	1,64
			30							1,88
		30	0			2,13			2,20	1,63
			30							1,54
40	0	0	0	2,08	1,69	1,53	2,33	2,02	2,21	1,75
			30							1,89
		30	0			2,20			2,23	1,81
			30							1,76
	30	30	0		1,91	1,52		1,93	2,13	1,76
			30							1,65
		0	30			1,98			2,35	1,72
			30							1,85

Lorsque l'augmentation de rendement, provoquée par l'apport de fumure, entraîne une baisse du niveau azoté exprimé en sec, on pourrait penser que la fumure est restée en deçà de la quantité optimum. Ce serait le cas, par exemple, de tous les traitements de la troisième coupe 1960, sauf le plus fort.

Lorsqu'au contraire l'augmentation de rendement s'accompagne également d'une augmentation de la teneur en sec du végétal, il faut savoir si l'on reste en dessous de richesses compatibles avec les normes d'alimentation. (Dans ce cas il faut également revoir les teneurs en vert car l'effet de l'azote est à ce sujet double, comme nous l'avons vu, puisqu'il augmente en même temps la teneur en eau).



Graphique 3. — *Fétuque-Fienvillers Azote* Kg/Ha.

Exportation hectare (tableau 6, graph. 3).

Comparaison des témoins. — Lors de la première coupe en 1959, il avait été prélevé par les parties aériennes des témoins, 60 unités d'azote (quantité considérable)

contre 23 en 1959. C'est, nous l'avons vu, la cause de la production importante de cette première coupe.

En deuxième coupe, l'on trouve 17,3 en 1959 et 12,1 en 1960.

En troisième coupe, l'on trouve 10,6 en 1959 et 9,2 en 1960.

En quatrième coupe, l'on trouve 9,06 en 1960.

C'est-à-dire que les cycles suivants de 1960 n'ont pu obtenir plus d'azote que les cycles correspondants de 1959 et que les quantités absorbées sont restées faibles.

TABLEAU 6

Azote kg/Ha

Doses d'azote				1959					1960						
1ere Coupe	2e Coupe	3e Coupe	4e Coupe	1ere Coupe	2e Coupe	1 + 5	3e Coupe	1 + 2 + 3	1ere Coupe	2e Coupe	1 + 2	3e Coupe	1 + 2 + 3	4e Coupe	1 + 2 +3+4
0	0	0	0	60	17,3	*77,3*	10,6	*87,9*	22,7	12,1	*34,8*	9,2	*44,0*	9,06	*53,06*
			40											27,87	*71,87*
		40	0				34,7	*112,0*				49,5	84,3	16,05	*100,35*
			30											27,07	*111,37*
	40	0	0		27,7	*87,7*	20,5	*108,2*		31,2	*53,9*	13,8	*67,7*	8,51	*76,21*
			30											14,32	*82,02*
		30	0				39,5	*127,2*				47,1	*101,0*	9,04	*110,04*
			30											8,24	*109,24*
40	0	0	0	105,4	16,1	*121,5*	12,4	*133,9*	53,7	19,5	*73,2*	15,2	*88,4*	9,83	*98,23*
			30											17,86	*106,26*
		30	0				32,4	*153,9*				42,8	116,0	21,21	*137,21*
			30											19,60	*135,60*
	30	0	0		24,6	*130,0*	19,9	*149,9*		36,1	*89,8*	14,9	*104,7*	9,69	*114,39*
			30											*18,30*	*123,00*
		30	0				32,1	161,1				42,5	*132,3*	14,31	*146,61*
			30											22,40	*154,70*

Comparaison de tous les traitements. — Si l'on réunit tous les traitements, et que l'on établit une courbe donnant la quantité d'azote prélevée par les parties aériennes en fonction du rendement *global* en vert (somme de toutes les coupes) on obtient (graph. 4) une corrélation très étroite. La droite de régression correspondante a l'équation suivante :

$$Y = 1,60 + 4,775\, x$$

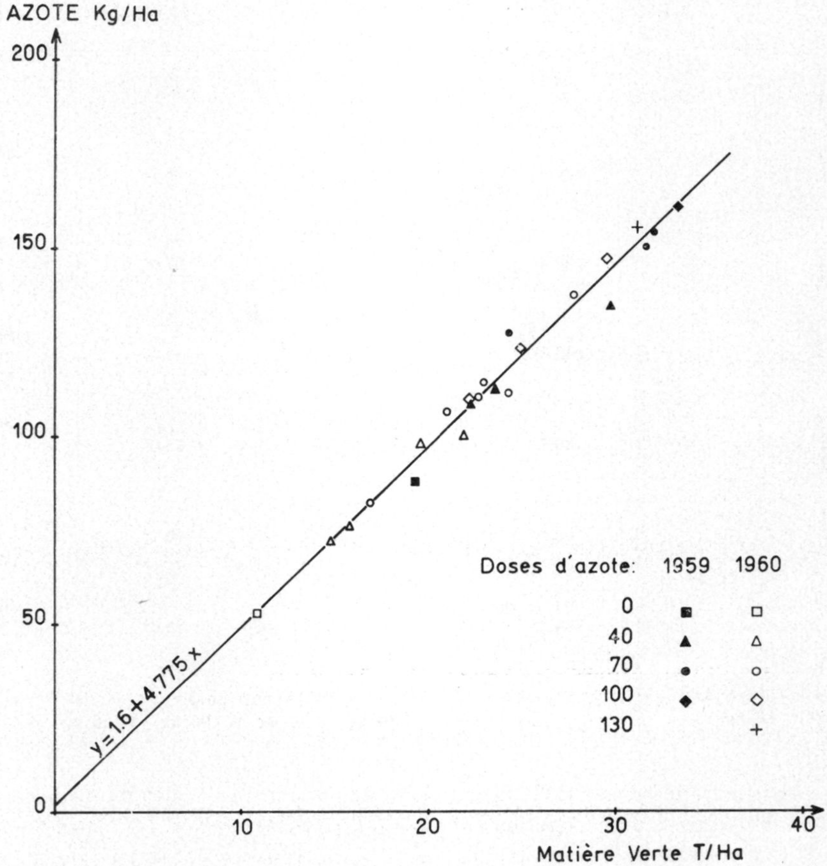
dans laquelle :

Y = kg/ha prélevés par la somme des coupes effectuées au cours des différents cycles ;

x = tonnes/ha de matière verte produit par l'ensemble des coupes.

La signification de cette régression donne une probabilité inférieure à 0,001.

On peut donc en tirer la conclusion, à travers ces deux années très différentes, et avec des fumures très variées, en dates d'application et en doses, que la production totale de cette fétuque (avec 3 ou 4 coupes) a déterminé une consommation de 4,775 kg d'azote par tonne de matière verte produite. Cela n'est pas tellement évident lorsque l'on regarde les teneurs en pour cent vert des coupes séparées.



Graphique 4. — *Azote prélevé par l'ensemble des coupes en fonction de leur tonnage total annuel.*

Efficacité des apports.

Cette efficacité peut être calculée, en comparant les doses apportées avec les quantités d'azote retrouvées dans les parties aériennes, déduction faite des témoins. Cette comparaison peut être faite soit par coupe, soit en cumulant les effets au cours des coupes successives. On peut ainsi voir l'effet de l'apport, d'une part, en fonction des traitements antérieurs et, d'autre part, sur les productions ultérieures (tableau 7).

TABLEAU 7

Azote retrouvé dans les parties aériennes.

— azote retrouvé dans la coupe suivant l'apport

— azote retrouvé pour l'ensemble des coupes accumulées.

1ere Coupe	2e Coupe	**1 + 2**	3e Coupe	**1 + 2 + 3**
—	—	—	—	—
			24,1^2	**24,1**^{2}
	10,4^2	**10,4**^{2}	9,9	**20,3**^{2}
			28,9^1	**39,3**^{3}
	—1,2	**44,2**^{2}	1,8	**46,0**^{2}
			21,8^1	**66,0**^{3}
45,4^2	7,3^1	**52,7**^{3}	9,3	**62,0**^{3}
			21,5^1	**74,2**^{4}

1ere Coupe	2e Coupe	**1 + 2**	3e Coupe	**1 + 2 + 3**	4e Coupe	**1 + 2 + 3 + 4**
—	—	—	—	—	—	—
					18,81^2	**18,81**^{2}
			40,3^2	**40,3**^{2}	6,99	**47,29**^{2}
					18,01^1	**58,31**^{3}
	19,1^2	**19,1**^{2}	4,6	**23,7**^{2}	— 0,55	**23,15**^{2}
					5,26^1	**28,96**^{3}
			37,9^1	**57,0**^{3}	— 0,02	**56,98**^{3}
					— 0,82^1	**56,18**^{4}
	7,4	**38,4**^{2}	6,0	**44,4**^{2}	0,77	**45,17**^{2}
					8,80^1	**53,2**^{3}
31,0^2			33,6^1	**72,0**^{3}	12,15	**84,15**^{3}
					10,54^1	**82,54**^{4}
	24,0^1	**55,0**^{3}	5,7	**60,7**^{3}	0,63	**61,33**^{3}
					9,24^1	**69,94**^{4}
			33,3$_1$	**88,3**^{4}	5,25	**93,55**^{4}
					13,34^1	**101,64**^{5}

Apport par cycle
1/30 kg 2/40 kg

Apport total
2/40 kg 3/70 kg 4/100 kg 5/130 kg

Il est curieux de noter que l'on retrouve parfois dans les seules parties aériennes la totalité de l'apport. Par exemple, en 1959, à la 1re coupe et en 1960 à la troisième coupe. Si l'on résume les variations des quantités retrouvées on obtient dans chaque cycle,

pour 40 unités de 10 à 45 unités,

pour 30 unités, de 7,3 à 37,9 unités,

se décomposant de la façon suivante pour les 30 unités :

	2e Coupe	3e Coupe	4e Coupe
1959................	7,3 et 10,4	21,5 et 28,9	
1960................	19,1 et 24	33,3 à 37,9	0 à 18

Les réponses en 3[e] coupe sont bien groupées quels que soient les antécédents.

Si maintenant on regarde les quantités totales retrouvées dans l'ensemble des cycles suivant la répartition des apports on peut obtenir le résultat suivant :

Apport	Quantité totale retrouvée par l'ensemble des cycles		
	1959	1960	
	3 Coupes	3 Coupes	4 Coupes
	—	—	—
40	de 20,3 à *46*	23,7 à *44,4*	23,15 à *47,29*
70	de 39,3 à 66	57,0 à *72,0*	28,96 à *84,15*
100	74,2	88,3	56,18 à 93,55
130	—	—	101,64

Dans cinq cas sur dix, on trouve des exemples où l'herbe a exporté, dans ses parties aériennes, plus qu'on ne lui a apporté.

Le coefficient d'utilisation, avec toutes les approximations que représente cette notion, est. (sauf dans un cas) toujours supérieur à 50 p. 100 pour dépasser donc parfois 100 p. 100.

Ce tableau semblerait également indiquer que l'azote est le mieux valorisé au cours du premier et du troisième cycle, les réponses du 2[e] et du 4[e] cycle étant beaucoup plus faibles.

CONCLUSIONS

La comparaison des résultats obtenus avec une fétuque au cours de deux années climatiques très différentes avec un plan de fumure identique, volontairement limitée en quantité, nous a permis de recueillir des observations intéressantes :

1° La réponse maximum à 40 unités d'azote a été la même les deux années : soit approximativement 10 T/ha de matière verte et 1,7 T/ha de matière sèche. Cette réponse a été obtenue à partir de rendements témoins très différents (15,6 T et 1,7 T).

2° Cet effet maximum a été obtenu dans des cycles différents et d'une façon difficilement prévisible.

3° On n'a pu que rarement noter une arrière action positive des fumures antérieures.

4° La teneur en azote, pour cent vert, varie largement d'un cycle à l'autre suivant les conditions climatiques. Les variations dûes aux traitements azotés peuvent être négatives, nulles ou positives.

5° On a pu cependant mettre en évidence une corrélation très nette entre la quantité totale de matière verte, produite au cours d'une année, et la quantité d'azote exportée par les parties aériennes (environ 4,77 kg par tonne de matière verte) et cela avec trois ou quatre coupes et une fumure azotée totale allant de 0 à 130 kg ha.

SUMMARY

COMPARATIVE RESULTS OF TWO YEAR TRIALS WITH NITROGEN FERTILIZERS TO FESCUE

Experiments with fescue, conducted over two years of greatly differing weather conditions and with identical amounts of fertilizers at low rates, resulted in the following interesting observations :

1. The maximum response to 40 units of nitrogen was the same in both years and amounted to about 10 tons of green matter and 1.7 tons of dry matter ; this response contrasts with the very variable yields in untreated controls (15.6 to 1.7 tons).

2. The maximum effects were obtained during different cycles, and in a way not easily fore seen in advance.

3. The fertilizing rarely showed any positive residual action.

4. The nitrogen percentage in the green matter showed great variations from one cycle to another, according to weather conditions ; the effects of nitrogen applications were either negative, or positive or there was no effect at all.

5. There was, however, a clear-cut correlation between green-matter production during a year and the amount of nitrogen taken up by the aerial parts (about 4.77 kg per ton of green matter) in three cuttings receiving none to 130 kg/ha nitrogen fertilizer.

ZUSAMMENFASSUNG

VERGLEICHENDE ERGEBNISSE ZWEIER VERSUCHSJAHRE MIT STICKSTOFFDUNGUNG AUF WIESENSCHWINGEL

Die Vergleichsergebnisse, die während zwei klimatisch sehr verschiedenen Jahren und mit einem gleichen willkürlich, quantitativ begrenzten Düngungsplan auf Wiesenschwingel erzielt wurden, erlaubten interessante Beobachtungen zu sammeln :

1° Das maximale Ergebnis auf 40-N-Einheiten war für beide Jahre dasselbe, ugf. 10 t/ha Grünmasse und 1,7 t/ha Trockenmasse. Dies wurde für sehr verschiedene Vergleichserträge erzielt. (15,6 t und 1,7 t).

2° Diese Maximalwirkung wurde in verschiedenen Zyklen und auf schwer vorherzusehende Art erzielt.

3° Nur sehr selten konnte eine positive Nachwirkung der vorhergehenden Düngungen festgestellt werden.

4° Der Stickstoffgehalt in Grün-Prozent schwankt sehr von einem Zyklus zum andern, je nach den klimatischen Bedingungen. Die dem Stickstoff zuzuschreibenden Schwankungen können negativ, null oder positiv sein.

5° Es konnte jedoch ein sehr deutlicher Zusammenhang zwischen totaler Grünmasse, die während eines Jahres erzeugt wurde, und der Menge Stickstoff, die durch die oberirdischen Pflanzenteile entzogen wurden (ugf. 4, 77 kg pro t Grünmasse) herausgestellt werden, und dies für drei oder vier Schnitte und einer Gesamt-N-Düngung von 0 bis 130 kg/ha.

Сравнительные результаты опыта азотистого удобрения овсяницы в течении двух лет.

Г. ЛЕФЕВР и Г. ХИРУ (Амьен).

Сравнительная оценка результатов полученных после опыта применения под овсянницу плана удобрений, с умыслом ограниченного в количестве, в течении двух лет во время которых климатические условия были совершенно различны, позволила прийти к интересным выводам :

1. Максимальный отклик на принесение 40 единиц азота был один и тот-же оба года, — приблизительно 10 тонн/га зеленой массы и 1,7 тонны/га сухой массы. Эта прибавка была получена исходя от совершенно разных контрольных урожаев (15,6 тонны/га и 1,7 тонны/га);

2. Вышеуказанный максимальный эффект получен был в течении разных циклов и его было трудно предвидеть;

3. Позитивное последействие пред'идущих удобрений наблюдалось очена редко;

4. Общий процент азота заключающийся в зеленой массе меняется в вависимости от циклов, то-есть от климатических условий. Вариации эти после примесения азотистых удобрений — или отрицательны, или положительны, или вообще могут отсутствовать;

5. Удалось все-же установить явное соотношение между общим весом зеленой массы полученной в течении одного года в результате трех или четырех косьб, при общем количестве принесенного азотистого удобрения варьировавшем от 0 до 130 кг/га, и количеством азота вынесенного надземными частями растения (приблизительно 4,77 кг на тонну зеленой массы).

Imprimerie BUSSIÈRE à Saint-Amand (Cher), France. — 13-11-1961

Dépôt légal : 4e trim. 1961. *N° d'imp. : 65*

Ann. agron., 1961, **12** (4), 385-398.

631-46

ACTIVITÉ CELLULOLYTIQUE DES BACTÉRIES AÉROBIES DU SOL

I. — ISOLEMENT ET PURIFICATION

J. RIVIÈRE

Laboratoire de Recherches de la Chaire de Microbiologie,
Institut national agronomique, Paris.

Avec la collaboration technique de Renée ROUX,
Société d'Études et d'Applications biochimiques, Jouy-en-Josas.

SOMMAIRE

L'emploi de silico-gel recouvert de papier filtre et de gélose à la cellulose permet d'isoler les Bactéries cellulolytiques aérobies du sol. La purification des *Cytophaga* et des *Sporocytophaga* se fait aisément dans un milieu liquide contenant du sulfate de kanamycine. Une Bactérie régulièrement associée avec *Sporocytophaga myxococcoides* a été isolée au cours de la purification de plusieurs souches de cette dernière espèce provenant d'origine différente. Cette Bactérie ne peut être éliminée qu'à l'aide du sulfate de kanamycine. L'étude des caractères culturaux et biochimiques oriente le diagnostic vers le genre *Arthrobacter* et oblige à créer une espèce nouvelle que l'on se propose de nommer *Arthrobacter consociatus*. On en donne ici une étude détaillée.

INTRODUCTION

Les Bactéries cellulolytiques aérobies représentent un groupe fort hétérogène et des techniques très différentes ont été utilisées pour les isoler. Tous les auteurs selon SIU (1951) sont d'accord pour employer la cellulose comme seule source de carbone dans une solution nutritive minérale additionnée ou non d'extrait de levure. Le milieu est solidifié en plaques par le silico-gel (WINOGRADSKY, 1929 ; IMCHENETSKY et SOLNTSEVA, 1936), ou la gélose si celle-ci est purifiée et ajoutée à faible concentration (JENSEN, 1940 ; STANIER, 1942). La cellulose peut être insoluble, sous forme fibreuse (feuille de papier filtre ou fragment de tissu) dans la technique initiale de WINOGRADSKY (1929), finement broyée après avoir été traitée ou non de diverses façons donnant de la cellulose dite précipitée (JENSEN, 1940 ; STANIER, 1942 ; HULCHER et KING, 1958), ou rendue soluble par d'autres procédés en cellulose-dextrines (FULLER et NORMAN, 1942 ; SKINNER, 1960). Ces techniques permettent un isolement relatif,

mais les purifications par passage sur un milieu minéral gélosé additionné de glucose ou de cellulose précipitée sont aléatoires. La gélose, même très pure, n'est pas favorable à certaines espèces (CHARPENTIER, 1960).

De plus la méthode classique pour purifier les *Sporocytophaga* consiste à utiliser la mobilité particulière de ces micro-organismes, sorte de reptation ou « swarming » à la surface d'un milieu gélosé à faible concentration à base de cellulose (JENSEN, 1940) ou de glucose stérilisé par filtration (STANIER, 1942). Nous n'avons jamais pu obtenir de bons résultats de cette façon, même après de nombreux passages, et la souche de collection, *Sporocytophaga myxococcoides* QMB 482 s'est avérée, elle aussi, être contaminée. Fait curieux, il n'y a qu'un seul contaminant, toujours le même, facilement isolé sur une gélose nutritive inclinée ; l'étude de son antibiogramme nous a conduit à élaborer une technique simple pour purifier ces Bactéries cellulolytiques aérobies. Le but de ce mémoire est donc de mettre au point une méthode permettant d'obtenir à l'état de cultures pures les diverses Bactéries cellulolytiques aérobies d'une terre donnée, de tester leur pouvoir cellulolytique, puis de décrire et d'identifier la Bactérie particulière qui semble régulièrement associée avec *Sporocytophaga myxococcoides*.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Nous avons utilisé une terre de jachère dont nous connaissions les caractéristiques physiques, chimiques et bactériologiques (RIVIÈRE, 1960). Le principe de la méthode consiste à faire des cultures d'enrichissement dans de la terre naturelle, à en isoler les diverses souches, puis à les purifier à l'aide de milieux variés. En effet la cellulolyse n'est pas l'apanage d'un groupe homogène de Bactéries, mais elle est retrouvée chez un assez grand nombre d'espèces réparties dans toute la systématique. Nous nous limitons aux Bactéries aérobies qui prédominent dans les sols cultivés de nos régions. Après avoir obtenu les diverses souches à l'état de pureté, il faut alors tester leur activité cellulolytique.

1° CULTURES D'ENRICHISSEMENT

On incorpore à 100 grammes de terre séchée à l'air, bien homogénéisée et préalablement tamisée, 5 grammes de poudre de cellulose WHATMAN pour chromatographie (BALSTON Lt ; Angleterre). Après avoir mélangé très soigneusement, on ajuste l'humidité à 20 p. 100, et le tout est mis dans une boîte de Pétri de 12 cm de diamètre introduite dans une conserve métallique. L'incubation se fait à 28° pendant quinze jours, l'humidité étant maintenue constamment à sa valeur initiale.

2° MILIEUX D'ISOLEMENT

Étant donné la grande diversité des Bactéries cellulolytiques aérobies, il est nécessaire d'employer des milieux très différents. Pour mettre au point les milieux d'isolement, nous avons fait de très nombreux essais, en prenant comme souches-test les souches suivantes choisies d'après leur pouvoir cellulolytique parmi un assez grand nombre en provenance des États-Unis et de Suède :

Sporocytophaga myxococcoides QMB 482 ;
Cellulomonas flavigena QMB 528 ;
Cellulomonas biazotea QMB 525 ;
Cytophaga KM ;
Cellvibrio sp.

Deux milieux d'isolement ont été retenus.

a) *Silico-gel*

On prépare du silico-gel selon la technique initiale de WINOGRADSKY (1929). Après imprégnation, les plaques sont stérilisées en les soumettant cinq minutes à l'action d'une lampe à rayons ultra violets.

L'ensemencement se fait de la façon suivante : 5 grammes de la culture d'enrichissement sont soigneusement broyés dans un mortier avec 45 ml d'eau ajoutés en plusieurs fois, puis recueillis dans une fiole Erlenmeyer de 250 ml agitée cinq minutes dans un Microid Flask Shaker (GRIFFIN et GEORGES Ltd ; Londres) avant de faire les dilutions. Deux gouttes des diverses solutions sont réparties à la surfaces des plaques ; si celles-ci sont bien sèches, les gouttes sont absorbées au bout de quelques heures (on utilise un compte-gouttes donnant 20 gouttes par ml). L'incubation se fait à 28° pendant huit jours. Ce milieu convient bien aux genres suivants : *Sporocytophaga*, *Cytophaga* et *Cellvibrio*, dont la croissance est difficile en présence de gélose (CHARPENTIER, 1960).

b) *Gélose à la cellulose*

Sa composition est la suivante :

Cellulose en poudre [1]	5 g	
$NaNO_3$	1 g	
Na_2HPO_4, 2 H_2O	1,18 g	Tampon M/150 pH 6,8
K H_2PO_4	0,91 g	
Mg SO_4, $7H_2O$	0,5 g	
KCl	0,5 g	
Extrait de levure (DIFCO)	0,5 g	
Hydrolysat de caséine (DIFCO)	0,5 g	
Gélose Noble (DIFCO)	10 g	
Eau	Q.s.p. 1 000 ml	

Après stérilisation (20 mn à 120°), ce milieu est coulé en plaques après avoir été bien agité pour que la poudre de cellulose soit répartie de façon homogène (cette opération doit se faire à 48 °). Quand elles sont bien sèches, on y ensemence deux gouttes de chaque dilution que l'on étale très soigneusement sur toute la surface. L'incubation se fait à 28° pendant huit jours. Ce milieu convient à toutes les autres Bactéries cellulolytiques aérobies qui donnent des colonies généralement entourées d'une très petite zone de cellulolyse.

3° MILIEUX DE PURIFICATION

La purification des Bactéries cellulolytiques aérobies se fait aussi avec deux types de milieux différents suivant la manière dont elles ont été isolées.

a) *Gélose inclinée*

Il s'agit d'une gélose à base de glucose stérilisé par filtration (0,1 p. 100). Sa composition est voisine de la précédente, mais sans cellulose, et contient en plus des peptones (0,1 p. 100 de Bactotryptone DIFCO). Après plusieurs passages, on obtient des colonies dont la pureté est vérifiée par un examen microscopique et des étalements sur plaques. Les *Cellulomonas* s'obtiennent ainsi facilement en cultures pures.

b) *Milieu liquide additionné d'antibiotiques.*

Dans le cas de certaines souches isolées au moyen du silico-gel (*Cytophaga* et *Sporocytophaga*) la purification avec de la gélose inclinée est inefficace. La souche de collection, *Sporocytophaga myxococcoides* QMB 482 s'est avérée, elle aussi, être contaminée. De plus, il n'y a qu'un seul contaminant, toujours le même, facilement isolé sur une gélose nutritive ; l'étude de son antibiogramme nous a conduit à élaborer une technique simple pour purifier ces Bactéries cellulolytiques aérobies. En effet on obtient de bons résultats par passages dans un milieu liquide contenant une bande de papier filtre DURIEUX n° 111 (1 × 6 cm) et des concentrations croissantes de sulfate de kanamycine (Kamycine BRISTOL), soit 2,5 — 5 — 10 mg par litre.

(1) La poudre de cellulose WHATMAN est mise à tremper dans de l'acide chlorhydrique N pendant 12 heures à froid, puis lavée sur Buchner pour éliminer l'acide avant d'être utilisée dans la préparation du milieu.

La composition du milieu la suivante :

Bacto-tryptone (DIFCO)	1 g	
Na NO_3	1 g	
KH_2PO_4	0,91 g	Tampon M/150 pH = 6,8
Na_2HPO_4 2H2O	1,18 g	
$MgSO_4$, $7H_2O$	0,5 g	
$FeSO_4$, $7H_2O$	0,05 g	
$MnSO_4$, H_2O	traces	
Extrait de levure (DIFCO)	0,5 g	
Eau	Q.s.p. 1 000 ml	

On le répartit à raison de 5ml par tube de 18 × 180 mm contenant une bande de papier filtre. On stérilise 20 minutes à 120°. A l'aide d'une spatule on ensemence largement sur le papier filtre légèrement au-dessus du niveau du liquide après avoir ajouté l'antibiotique aseptiquement. Après cinq passages (chaque repiquage se fait après huit jours d'incubation à 28°) la pureté de chaque souche est vérifiée par un examen microscopique, un étalement sur une plaque de gélose nutritive et une culture dans du bouillon nutritif. En effet les *Cytophaga* et les *Sporocytophaga* ne présentent aucune croissance dans ces derniers milieux.

4° Test d'activité cellulolytique

Selon Siu (1951), le test le plus simple consiste à ensemencer des bandes de papier filtre partiellement immergées dans une solution minérale. C'est ce que nous avons fait en utilisant le milieu précédent ans antibiotique : après huit jours d'incubation à 28°, une légère agitation doit amener une désintégration du papier pour conclure qu'il y a un pouvoir cellulolytique notable.

5° Identification d'une souche particulière : milieux, durées d'incubation et examens microscopiques

Au cours de la purification de *Sporocytophaga myxococcoides*, nous avons remarqué la présence d'une association qui paraît constante avec une Bactérie particulière dont l'identification s'est avérée assez délicate. Toutes les colonies obtenues lors des subcultures de *Sporocytophaga myxococcoides* sur gélose nutritive et dans du bouillon nutritif faites pour vérifier la pureté de cette souche, sont purifiées par passage sur des plaques de gélose nutritive, puis ensemencées dans les divers milieux d'identification, incubées et examinées comme suit :

Gélose nutritive inclinée et bouillon nutritif.

On observe les caractères culturaux et on fait les examens microscopiques (état frais, coloration de Gram, coloration de cils) après douze, quarante-huit, et soixante-douze heures à 28°. On note aussi la croissance (par turbidimétrie) pendant quatorze jours, tous les jours, à 15°, 20°, 25°, 28°, 30° et 37°, dans le bouillon nutritif.

Pomme de terre

La culture est observée après quatre, huit et quatorze jours à 28°.

Fermentation des glucides.

On emploie de l'eau peptonée au rouge de phénol (dans des tubes contenant une cloche de Durham), et de la gélose inclinée au bleu de bromothymol additionnées de 0,5 p. 100 des divers glucides stérilisés par filtration (arabinose, xylose, glucose, fructose, galactose, saccharose, lactose, maltose, cellobiose, mannitol et glycérine). On note l'évolution du pH après un, deux, quatre et sept jours à 28°. Dans le cas de l'amidon, on utilise une gélose nutritive à l'amidon de pomme de terre (0,5 p. 100) ensemencée par piqûre centrale : l'amylolyse se détecte après révélation à l'alcool à 95° après cinq et dix jours d'incubation à 28°.

Milieu de Clark et Lubs et milieu de Fouad.

On y recherche la production d'acétyl-méthyl-carbinol et on y fait la réaction au rouge de méthyle après deux et quatre jours d'incubation à 28°.

Gélose au citrate de Simmons:

La culture est observée pendant sept jours à 28°.

Lait tournesolé.

Les réactions sont notées pendant quatorze jours à 28°.

Eau peptonée.

On recherche la production d'indole après vingt-quatre et quarante-huit heures à 28°.

Milieu de Christensen.

On observe l'hydrolyse de l'urée tous les jours pendant quatorze jours à 28°.

Bouillon nitraté cystéiné.

Il contient 2 grammes d'extrait de levure DIFCO, 2 grammes de peptones (Bacto-tryptone DIFCO), 1 gramme de cystéine et 1 gramme de nitrate de potasse. Après sept jours à 28°, on recherche l'hydrogène sulfuré (avec un papier au sous-acétate de plomb), l'ammoniaque (par le réactif de Nessler), et les nitrates (par le réactif de Griess).

Gélatine.

On emploie une solution à 15 p. 100 (poids/volume) de gélatine dans de l'eau distillée. Les cultures sont incubées à 20° et les résultats notés après quatorze et vingt huit jours.

Nutrition azotée.

Le milieu contient KNO_3, 1 gramme ; K_2HPO_4, 1 gramme ; $(NH_4)_2HPO_4$, 1 gramme ; $MgSO_4$, $7H_2O$, 0,1 gramme ; Mg Cl_26H_2O, 0,2 gramme ; $CaCl_2H_2O$, 0,2 gramme ;$FeCl_3$, 0,01 gramme, dans 1 litre d'eau distillée. On y ajoute 5 grammes de glucose stérilisé par filtration. On note la croissance (par turbidimétrie) après quatorze jours à 28°.

Production de catalase.

On la recherche après vingt-quatre heures à 28° dans des cultures sur de la gélose inclinée ou dans du bouillon nutritif.

Besoins en oxygène.

On les détermine par l'aspect de la culture dans de la gélose VF glucosée de Prévot après vingt-quatre et quarante-huit heures d'incubation à 28°.

Mobilité.

On examine au contraste de phase une suspension dans la solution de Ringer d'une culture de dix-huit heures à 28° dans de la gélose molle.

Gélose molle à l'extrait de terre.

On l'ensemence par piqûre centrale et on y détermine la vitalité des souches par subcultures après incubation à 15° pendant trente à soixante jours.

RÉSULTATS

1° Techniques d'isolement et de purification des Bactéries cellulolytiques aérobies du sol

Les Bactéries cellulolytiques aérobies ont été identifiées d'après les caractères donnés dans la dernière édition du *Bergey's Manual* (Breed et al., 1957). Parmi les souches isolées, sept ont un pouvoir cellulolytique décelable :

Sporocytophaga myxococcoides ;
Cytophaga hutchinsonii ;
Cytophaga aurantiaca ;
Cellulomonas flavigena ;
Cellulomonas biazotea ;
Cellulomonas fimi ;
Cellvibrio ochraceus.

PLANCHE I

Cultures d'*Arthrobacter consociatus* sur gélose nutritive inclinée. Toutes les préparations sont colorées par la safranine.

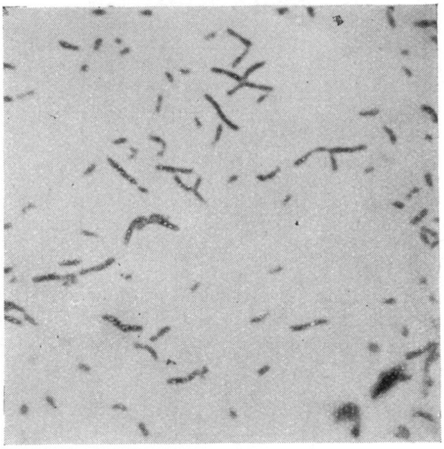


FIG. 1. — *Culture âgée de 12 heures à 28°. On voit des formes en V très caractéristiques.*

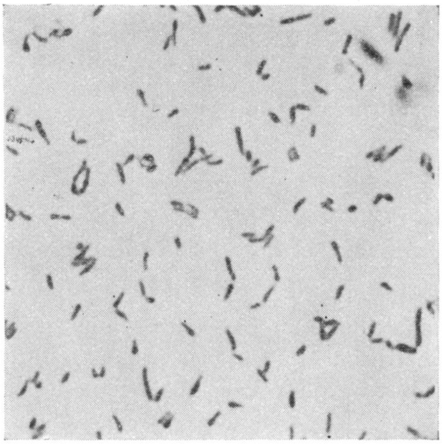


FIG. 2. — *Culture âgée de 18 heures à 28°. Les formes allongées commencent à se fragmenter.*

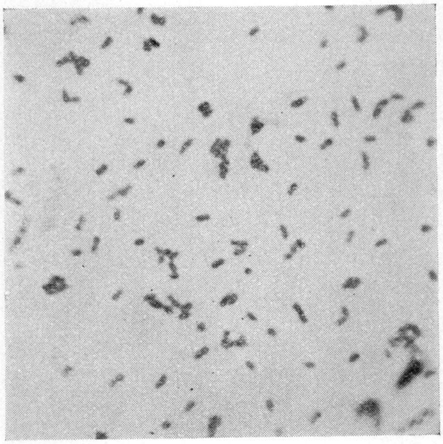


FIG. 3. — *Culture âgée de 24 heures à 28°. Il apparaît des bâtonnets et des coques aux dépens des formes allongées.*

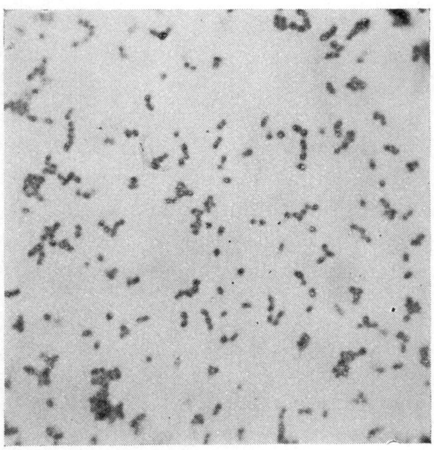


FIG. 4. — *Culture âgée de 48 heures à 28°. Les cellules sont toutes coccoïdes.*

Les techniques permettant de les isoler et de les purifier sont résumées dans le tableau 1.

TABLEAU I

Isolement et purification des Bactéries cellulolytiques aérobies du sol.

Bactéries cellulolytiques aérobies	Milieux d'isolement		Milieux de purification				Pouvoir cellulolytique
	Silico-gel	Gélose à la cellulose	Gélose glucosée inclinée	Milieu liquide à la Kanamycine (mg par litre)			
				2,5	5	10	
Sporocytophaga myxococcoïdes ..	+	+0	+	+	+	+	moyen
Cytophaga hutchinsonii	+	+0	+	+	+	0	moyen
Cytophaga aurantiaca	+	+0	+	+	0	0	moyen
Cellulomonas flavigena	0	+	+	0	0	0	fort
Cellulomonas biazotea	0	+	+	0	0	0	moyen
Cellulomonas fimi	0	+	+	0	0	0	faible
Cellvibrio ochraceus	+	+0	0	0	0	0	très faible

+ = croissance nette permettant un isolement facile.
+ 0 = croissance ralentie rendant l'isolement délicat.
0 = pas de croissance.

2° Isolement et description d'une nouvelle espèce d'Arthrobacter associée avec Sporocytophaga myxococcoides

A partir de cinq souches de *Sporocytophaga myxococcoides,* quatre isolées du sol à l'aide du silico-gel et purifiées partiellement par passages sur plaque de gélose glucosée, et la souche de collection *Sporocytophaga myxococcoides* QMB 482, nous avons obtenu des Bactéries contaminantes en cultures pures toutes semblables après avoir été identifiées d'après les caractères donnés dans la dernière édition du *Bergey's Manual* (Breed et al., 1957). Il s'agit d'un germe qui paraît se retrouver constamment associé à *Sporocytophaga myxococcoides,* quelle que soit son origine, et qu'on ne peut éliminer qu'à l'aide du sulfate de kanamycine (10 mg par litre).

a) *Morphologie microscopique.*

Dans les cultures jeunes, les germes se présentent sous forme de bâtonnets de dimensions variables, généralement de 0,5 à 0,8 sur 1,0 à 4,0 microns, et de formes diverses, droits à incurvés, renflés ou non, quelquefois en V (v. pl. 1, fig 1 et 2). Ces formes allongées se fragmentent rapidement en bâtonnets plus courts et en coques (v. pl. 1, fig. 3). Dans les vieilles cultures les cellules sont toutes coccoïdes (v. pl. 1, fig. 4). Ils se colorent facilement par les colorants d'aniline et sont Gram variables : Gram positifs dans les très jeunes cultures (moins de douze heures à 28°), Gram négatifs ensuite. Ils apparaissent immobiles.

b) *Exigences nutritives.*

Les souches se développent dans les milieux organiques ordinaires : s'il est nécessaire d'avoir des peptones, l'extrait de levure ou l'hydrolysat de caséine semblent favoriser leur croissance. La température d'incubation la plus favorable est d'environ 25°-28° ; à 37°, il n'y a presque plus de croissance ; à 15° le temps de latence est très allongé, et la plupart des souches ne cultivent pratiquement pas à 10°. La vitalité de ces germes est très longue. La meilleure conservation est obtenue dans la gélose molle à l'extrait de terre ; on conserve ainsi les cellules vivantes à 15° pendant trente à soixante jours. Toutes les souches sont aérobies : après vingt-quatre heures la culture apparait dans la zone d'aérobiose stricte de la gélose VF glucosée de Prévot. Il y a une production abondante de catalase, en bouillon et sur gélose.

c) *Caractères culturaux* (*à* 28°).

Dans le bouillon nutritif ordinaire, il y a une culture moyenne en vingt-quatre heures avec trouble du milieu et un léger dépôt. L'addition de glucose accélère la croissance.

Sur gélose nutritive, la culture est abondante : après douze heures les colonies sont rondes, transparentes, bombées, à bords lisses, de 1 à 3 mm de diamètre, puis elles deviennent muqueuses, très bombées, luisantes, et finissent par couler. Au bout de quinze jours apparaît une pigmentation rose-orangée. Ces colonies s'émulsionnent très facilement dans l'eau physiologique. Ces germes immobiles ensemencés par piqûre dans de la gélose molle ne diffusent pas, mais donnent une culture très muqueuse en surface. Sur pomme de terre, on observe une culture abondante, crémeuse, luisante se pigmentant en rose-orangé au bout de huit jours.

d) *Métabolisme glucidique.*

Dans l'eau peptonée au rouge de phénol, il n'y a pas de fermentation quel que soit le glucide ajouté. Par contre, sur gélose inclinée au bleu de bromothymol additionnée de 1 p. 100 de glucose, celui-ci est légèrement fermenté, mais l'acidification n'est pas définitive et disparaît après quarante-huit heures.

Sur gélose à l'amidon, on observe une zone d'amylolyse à partir du cinquième jour d'incubation. Dans le milieu de Clark et Lubs, ou dans celui de Fouad, la réaction au rouge de méthyle et la recherche de l'acétyl-méthyl-carbinol sont négatives. Sur gélose au citrate de Simmons, il n'y a pas de culture. La cellulose n'est pas hydrolysée.

e) *Métabolisme azoté.*

Le lait tournesolé n'est pas modifié même après quinze jours de culture. Il n'y a pas d'indole à partir d'une culture dans de l'eau peptonée. Dans du bouillon nitraté (0, 1 p. 100) et cystéiné (0, 1 p. 100), après cinq jours il y a des traces de nitrites, mais pas d'hydrogène sulfuré. L'urée n'est pas hydrolysée. Ces germes ne peuvent utiliser l'azote minéral (nitrates et sels ammoniacaux) pour leur croissance ; les peptones sont indispensables. La gélatine n'est pas liquéfiée, même après un mois.

PLANCHE II

Cultures de *Sporocytophaga myxococcoides* sur une bande de papier filtre partiellement immergée dans une solution nutritive. Les préparations sont colorées par l'érythrosine.

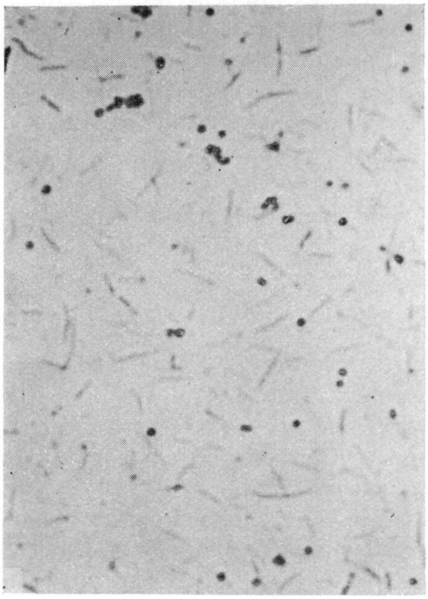


FIG. 5. — *Souche non purifiée par le sulfate de kanamycine âgée de 8 jours, cultivée dans une solution minérale à 28°.*
Les formes coccoïdes des Arthrobacter se confondent avec les microcystes.

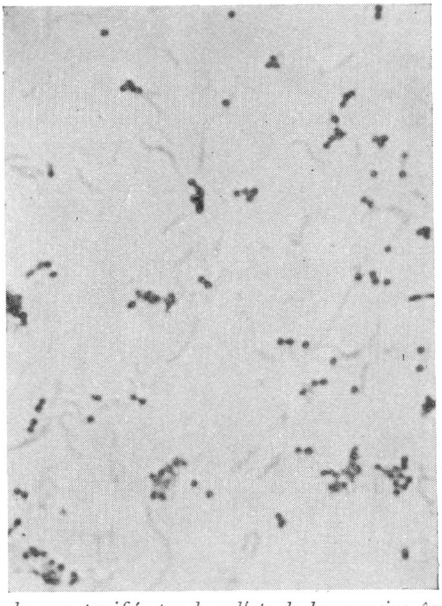


FIG. 6. — *Souche non purifiée par le sulfate de kanamycine âgée de 8 jours, cultivée dans une solution organique à 28°.*
On voit qu'il y a beaucoup de formes coccoïdes.

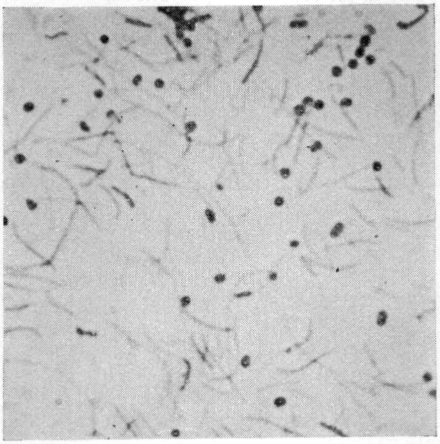


FIG. 7. — *Souche non purifiée par le sulfate de kanamycine âgée de 8 jours, cultivée dans une solution organique à 28°.*
Le grossissement étant plus fort permet de distinguer les formes coccoïdes qui sont dans le haut de la figure.

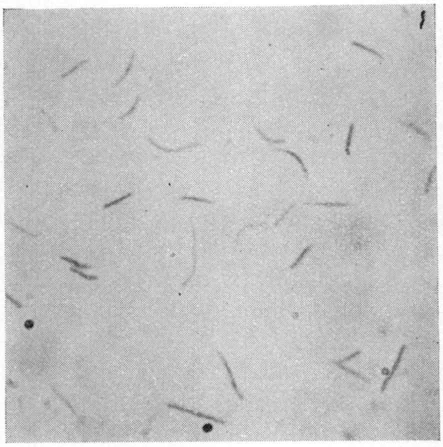


FIG. 8. — *Souche purifiée par le sulfate de kanamycine âgée de 8 jours, cultivée dans une solution organique à 28°.*
Il y a deux microcystes en bas et à gauche de la figure.
On ne voit plus de formes coccoïdes.

f) *Sensibilité aux antibiotiques.*

Leur étude a été faite sur une plaque de gélose par la méthode des disques. Les antibiotiques peuvent être rangés en trois groupes suivant leur action contre les diverses souches de ce germe qui sont ;

Résistantes vis-à-vis de : Novobiocine, Polymyxine, Bacitracine, Oléandomycine et Colimycine.

Sensibles vis-à-vis de : Auréomycine, Pénicilline, Néomycine, Spiramycine, Chloramphénicol, Tétracycline, Framycétine et Terramycine.

Très sensibles vis-à-vis de : Carbomycine, Erythromycine, Streptomycine et Kanamycine.

DISCUSSION

On voit qu'il n'existe pas de technique unique pour isoler et purifier toutes les Bactéries cellulolytiques aérobies du sol. Quand on peut employer des milieux gélosés, la méthode classique donne des résultats très satisfaisants. Toutes les souches de collection que nous avons pu nous procurer étaient pures, mais deux d'entre elles seulement avaient un pouvoir cellulolytique notable, *Cellulomonas flavigena* QMB 528 et *Cellulomonas biazotea* QMB 525. Dans le cas des *Sporocytophaga* et des *Cytophaga*, il semble que la gélose, même purifiée, possède un pouvoir inhibiteur (CHARPENTIER, 1960) : la croissance est lente, peu de colonies apparaissent, généralement de très petites dimensions, rendant les isolements difficiles. L'emploi du silico-gel permet, au contraire, d'obtenir un isolement assez aisé, mais la purification est impossible, car les colonies sont plus ou moins muqueuses et constituées, à côté des Bactéries cellulolytiques, de contaminants muqueux non dissociables. Ces Bactéries contaminantes se retrouvent à la fois dans les souches de collection étiquetées pures, comme *Sporocytophaga myxococcoides* QMB 482, et dans les souches que nous avons isolées et purifiées suivant les techniques habituelles. L'étude de l'antibiogramme des souches muqueuses contaminantes nous a conduit à élaborer une technique simple pour purifier ce groupe de Bactéries cellulolytiques aérobies. Nous avons essayé à diverses concentrations tous les antibiotiques possibles, et le sulfate de Kanamycine (Kamycine BRISTOL) nous a permis d'obtenir une purification totale après un certain nombre de passages avec des concentrations croissantes : 2,5 mg/litre, 5 mg/litre et 10 mg/litre. Les souches ainsi purifiées ont d'ailleurs un pouvoir cellulolytique au moins aussi élevé qu'avant la purification. Il semble qu'il y ait une sorte d'association étroite entre certaines souches de *Sporocytophaga myxococcoides* et une Bactérie muqueuse.

Celle-ci appartient au genre *Arthrobacter* dont elle possède les principales caractéristiques : habitat, morphologie, caractères culturaux, aérobiose, production de nitrites, faible action glucidolytique. Cependant il s'agit d'une espèce différente de celles décrites jusqu'ici ; en particulier elle est nettement distincte d'*Arthrobacter aurescens* : la pigmentation est tardive, il n'y a pas de production d'hydrogène sulfuré, elle n'utilise pas l'azote minéral (nitrate ou sels ammoniacaux,) ni les citrates.

On en fera une espèce nouvelle pour laquelle le nom d'*Arthrobacter consociatus* pourrait convenir. Elle semble régulièrement associée avec *Sporocytophaga myxococcoides* et sa culture muqueuse ne peut être séparée de la gelée cytophagienne au cours des purifications successives ; seule sa sensibilité au sulfate de kanamycine permet de

l'éliminer après plusieurs passages, et d'obtenir des cultures pures de *Sporocytophaga myxococcoides*. En général cette dernière Bactérie se cultive dans un milieu minéral contenant de la cellulose : en fin de culture, il y a une faible croissance d'*Arthrobacter consociatus* probablement aux dépens de l'azote organique résultant de l'autolyse des vieilles cellules de *Sporocytophaga myxococcoides* et du glucose provenant de l'hydrolyse de la cellulose (Fahraeus, 1947). Mais les formes coccoïdes simulent des microcystes et peuvent passer inaperçues (v. pl. II, fig. 5). Si le milieu contient des substances organiques (peptones, extrait de levure, hydrolysat de caséine), les *Arthrobacter* sont beaucoup plus nombreux (v. pl. II, fig. 6 et 7). Après purification par le sulfate de kanamycine, dans les milieux organiques, en fin de culture, on voit apparaitre des microcystes en petit nombre, un peu plus volumineux que les coccoïdes précédemment observés (v. pl. II, fig. 8).

Reçu pour publication en juillet 1961.

RÉSUMÉ

Les conclusions que l'on peut tirer de cette étude sont les suivantes :

1° Il n'existe pas de technique unique pour isoler et purifier toutes les Bactéries cellulolytiques aérobies d'un sol donné. L'emploi conjointement de silico-gel recouvert de papier filtre et de gélose à la cellulose permet leur isolement. La purification des *Cytophaga* et des *Sporocytophaga* se fait aisément dans un milieu liquide contenant une bande de papier filtre et rendu sélectif par du sulfate de kanamycine. Les *Cellulomonas* se purifient sans difficultés à l'aide d'un milieu gélosé additionné de glucose.

2° Une Bactérie régulièrement associée avec *Sporocytophaga myxococcoides* a été isolée au cours de la purification de plusieurs souches de cette dernière espèce provenant d'origine différente. Cette Bactérie ayant une culture muqueuse ne peut être séparée de la gelée cytophagienne malgré de nombreuses purifications successives. Seule sa sensibilité au sulfate de kanamycine (10 mg par litre) permet de l'éliminer et d'obtenir des cultures pures de *Sporocytophaga myxococcoides*. L'étude de ses caractères culturaux et biochimiques oriente le diagnostic vers le genre *Arthrobacter* et oblige à créer une espèce nouvelle que l'on se propose de nommer *Arthrobacter consociatus*.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Monsieur H. S. Levinson, Quatermaster Research and Engineering Center, Natick, Massachusetts, U. S. A., et Monsieur G. Fahraeus, Université d'Uppsala, Suède qui nous ont procuré ces diverses souches. Nos remerciements s'adressent aussi au laboratoire Bristol qui nous a procuré la Kamycine.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Breed R. S., Murray E. G. D., and Smith N. R., 1957. *Bergey's Manual oj Determinative Bacteriolo gy*, 7e éd., Williams et Wilkins, Baltimore, 890.

Charpentier M., 1960. Répartition des micro-organismes cellulolytiques du sol. I — Les techniques. *Ann. Inst. Pasteur*, **99**, 153.

Fahraeus G., 1947. Studies in the cellulose decomposition by *Cytophaga*. *Symb. Bot. Upsaliensis*, **2**, 56.

Fuller W. H. and Norman A. G., 1942. A cellulose-dextrin medium for identifying cellulose organisms in sol. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **7**, 243.

Hulcher F. H. and King K. W., 1958. Dissacharide preference of an aerobic cellulolytic bacterium, *Cellvibrio gilvus*. *J. Bacteriol.*, **76**, 565.

Imchenetsky A. A., et Solntseva L. L. L., 1936. Les Bactéries cellulolytiques aérobies (en russe). *C. R. Acad. Sci., U. R. S. S., Série Biol.*, **6**, 1129.

Ann. agron., 1961, **12** (4), 399-424.

631. 46

ACTIVITÉ CELLULOLYTIQUE DES BACTÉRIES AÉROBIES DU SOL

II — ACTION DES FACTEURS DU MILIEU SUR LA PRODUCTION DE CELLULASES BACTÉRIENNES

J. RIVIÈRE

Laboratoire de Recherches de la Chaire de Microbiologie,
Institut national agronomique, Paris.

avec la collaboration technique de Renée ROUX,
Société d'Études et d'Applications biochimiques, Jouy-en-Josas.

SOMMAIRE

La cellulase est définie comme l'enzyme dégradant les chaînes de cellulose par hydrolyse des liaisons β-1-4 glucosidiques. Son activité est mesurée par la production de sucres réducteurs à partir de la carboxy-méthyl-cellulose. L'étude de l'action des facteurs du milieu sur la synthèse de cellulase par trois souches représentatives de l'ensemble des Bactéries cellulolytiques aérobies d'un sol donné permet de définir les meilleures conditions de culture : durée d'incubation, température, pH, aération, source d'azote, source de carbone, facteurs de croissance, et concentration molaire en tampon phosphate. Si ces conditions sont réalisées, la cellulolyse mesurée par le pourcentage de perte de poids de la cellulose peut atteindre 100 p. 100 dans le cas de *Cytophaga aurantiaca A* et de *Sporocytophaga myxococcoides B*.

INTRODUCTION

L'hydrolyse enzymatique de la cellulose est une réaction importante dans la nature : réalisée par les micro-organismes du sol, c'est le premier stade dans la dégradation de la cellulose, constituant important du tissu végétal, source majeure de carbone pour le sol. Depuis une quinzaine d'années, c'est une question très étudiée, mais encore incomplètement élucidée, malgré de nombreux travaux cités dans des revues bibliographiques récentes (REESE et LEVINSON, 1952 ; SIU et REESE, 1953 ; REESE, 1956 ; HALLIWELL, 1959).

Les auteurs ne s'accordent pas sur l'unicité ou la pluralité des cellulases, bien qu'il semble que la deuxième conception soit admise par la plupart d'entre eux. Selon WHITAKER et al. (1953, 1954), une seule enzyme assure la cellulolyse dans

le cas de *Myrothecium verrucaria* ; cependant KOOIMAN et al. (1953) détectent en plus la présence d'une cellobiase. Un peu plus tard GILLIGAN et REESE (1954) séparent par chromatographie sur papier et sur colonnes de phosphate de calcium plusieurs composants cellulolytiques dans les filtrats de culture de la même souche. Ce qui semble confirmer l'hypothèse de REESE et de LEVINSON (1952, 1956, 1959) selon laquelle la cellulolyse se fait en trois temps, les cellulases comprenant au moins deux enzymes différentes dont l'une, C_1, libère des chaînes polyosidiques linéaires, se manifestant par une baisse de résistance à la traction des fibres de coton (BLUM et STAHL, 1952), alors que l'autre, Cx, continue le processus d'hydrolyse selon le schéma suivant :

Cellulose $\xrightarrow{C_1}$ longue chaîne de β1-4 anhydroglucose $\xrightarrow{C_x}$ Cellobiose $\xrightarrow{\beta \text{ Glucosidase}}$ Glucose

← exocellulaire → ← endocellulaire →

Mais l'existence de C_1 est très problématique ; selon REESE, (1956) elle est liée au fait que certains micro-organismes sont incapables d'attaquer la cellulose, mais peuvent hydrolyser des celluloses dégradées comme la carboxy-méthyl-cellulose. Dans ce cas, on admet que Cx se confond avec la carboxy-méthyl-cellulase, laquelle serait formée de plusieurs constituants (REESE, 1956). Depuis, KING (1956), MILLER et BLUM (1956), HASH (1957) signalent avoir obtenu d'autres fractions enzymatiques un peu différentes, surtout par électrophorèse (STORVICK et KING, 1960). En fait presque tous ces résultats proviennent d'expériences réalisées avec des Champignons cellulolytiques. Dans le cas des Bactéries aérobies, les conclusions précises sont beaucoup plus rares. On signale même des faits assez curieux : alors que toutes les cellulases fongiques sont adaptatives (MANDELS et REESE, 1960), les cellulases bactériennes peuvent être soit adaptatives (SIJPESTEIJN et FAHRAEUS, 1949 ; REESE et LEVINSON, 1952), soit constitutives (HAMMERSTROM et al., 1955 ; HULCHER et KING, 1958).

C'est pourquoi ce mémoire est consacré à l'étude des cellulases bactériennes qui paraissent être produites en quantités bien inférieures à celles des Champignons (SIU, 1951). Or, on se demande à la lecture des résultats obtenus (SIU, 1951 ; SIU et REESE, 1953) si les conditions d'obtention des cellulases bactériennes ont été convenablement déterminées. Bien entendu, il n'est pas question ici d'aborder l'étude enzymologique de la cellulolyse bactérienne pour laquelle nous ne sommes pas compétents. On se contentera avec la plupart des auteurs (REESE et al., 1952, 1956, 1959) d'admettre que la cellulase Cx se confond avec la carboxy-méthyl-cellulase, et de rechercher dans quelles conditions les Bactéries cellulolytiques aérobies produisent la plus grande quantité de cellulase définie ci-dessus.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Une fois isolées et identifiées (RIVIÈRE, 1961) les Bactéries cellulolytiques aérobies du sol sont rangées dans trois groupes suivant le genre auquel elles appartiennent, *Sporocytophaga*, *Cytophaga* et *Cellulomonas*. Nous étudierons l'action des facteurs du milieu sur la production de cellulase en prenant une souche représentative de chaque groupe après avoir choisi, bien entendu, la souche montrant l'activité cellulolytique la plus élevée au cours du test, soit *Cytophaga aurantiaca A*, *Sporocytophaga myxococcoides B ei Cellulomonas flavigena C.*

1° Choix de l'inoculum.

Pendant longtemps (Siu, 1951) on pensait que certaines souches perdaient leur pouvoir cellulolytique après un certain nombre de repiquages au cours des transferts au laboratoire. Ce fait provenait vraisemblablement de la présence de Bactéries contaminantes, car Fahraeus (1947) a pu conserver des souches de *Cytophaga globulosa* pendant plusieurs années sans observer de modification dans leurs propriétés morphologiques ou physiologiques. La première précaution consiste donc à vérifier soigneusement la pureté des souches choisies par de nombreuses subcultures sur gélose inclinée et dans du bouillon nutritif. Puis les souches sont repiquées dans le milieu utilisé pour le test d'activité cellulolytique (rivière, 1961). Après huit jours d'incubation à 28°, les tubes sont agités cinq minutes dans un Microid Flask Shaker afin d'avoir une suspension homogène dont on ensemence 5 ml., l'inoculum devant être important (Fahraeus, 1947).

2° Cultures agitées.

Du point de vue de l'action de l'oxygène, ces Bactéries sont aérobies (*Cytophaga et Sporocytophaga*) ou anaérobies facultatives (*Cellulomonas*). Dans les deux cas, l'aération, et par suite l'agitation dans un shaker, augmente la cellulolyse (Reese et al, 1947, 1956). Une des difficultés évoquées (Reese, 1959) dans l'étude de la décomposition de la cellulose par les micro-organismes est le fait que la cellulose soit insoluble dans l'eau : on peut résoudre partiellement le problème en réduisant mécaniquement la cellulose en fines particules possédant encore les propriétés du matériel original. La source la plus commode, facilement reproductible, est la poudre de cellulose Whatman pour chromatographie utilisée à raison de 5 g par litre dans une solution minérale.

La solution minérale choisie est un peu différente de celle mise au point par Fuller (1942). Elle contient les sels suivants :

$NaNO_3$	1 g	$FeSO_4$, $7H_2O$	0,05 g
$MgSO_4$, $7H_2O$	0,5 g	$CaCl_2$, $2H_2O$	0,2 g
$MnSO_4$, H_2O	0,002 g	Eau distillée	q.s.p. 1 litre

Le milieu est tamponné avec des solutions de phosphates à diverses concentrations et à différents pH.

On prépare les deux solutions suivantes :

a) Solution 2M/15 de phosphate monopotassique.

18,156 g de sel recristallisé séché à 100° à poids constant sont dissous dans 1000 ml d'eau bidistillée.

b) Solution 2M/15 de phosphate disodique :

23, 752 g de Na_2HPO_4,$2H_2O$ sont dissous dans 1000 ml d'eau bidistillée.

Le tout est stérilisé 20 minutes à 120° après avoir été réparti dans des fioles Erlenmeyer de 500 ml à raison de 50 ml de solution minérale à concentration double, plus la quantité nécessaire de tampon phosphate. On y ajoute ensuite aseptiquement les divers constituants essayés, stérilisés par filtration, et de l'eau de telle sorte que le volume final soit de 100 ml. Puis les fioles sont mises à incuber dans un shaker à raison de 120 coups par minute pendant plusieurs jours, à des températures variables.

3° Dosage des cellulases.

A la fin de la période d'incubation, la solution est filtrée à travers un filtre de verre fritté de porosité moyenne. Les filtrats sont toujours clairs. S'il faut les conserver, on ajoute un millilitre d'une solution de merthiolate (1) à 1 p. 100 dans 100 ml de filtrat.

On détermine ensuite la quantité de cellulase produite en mesurant l'activité de Cx sur la carboxy-méthyl-cellulose, Cx se confondant avec la carboxy-méthyl-cellulase (Reese et al ; 1956) et étant incapable d'agir sur la poudre de cellulose.

a*) Principe de la méthode.*

On dose le glucose produit au cours de l'hydrolyse d'une solution de carboxy-méthyl-cellulose à 1 p. 100 à 37° pendant une heure, dans un milieu tamponné à pH 4,6, par une solution enzymatique (reese et al., 1956). Les résultats sont exprimés en unités cellulasiques : l'unité étant la quantité d'enzyme qui, dans les conditions expérimentales, libère à partir du substrat une quantité de sucres réducteurs donnant avec le réactif dinitrosalicylique (Sumner et Somers, 1944) la même densité optique que 0,5 mg de glucose.

(1) Merthiolate Lilly : Ethylmercurithiosalicylate de sodium

b) *Réactifs,*

1 — D (+) glucose pur.

2 — Substrat = carboxy-méthyl-cellulose (Blanose R. P. 210 NOVACEL). On le prépare de la façon suivante : dans 900 ml d'eau distillée soumise à une agitation rapide, on verse en pluie 10 g de Blanose, avec précaution, pour éviter les grumeaux. On agite trente minutes et on laisse reposer douze heures. On ajoute 100 ml de tampon à pH 4,6. On agite dix minutes, puis on filtre sur verre fritté n° 2. Cette solution se conserve un mois à la température du laboratoire.

3 — Tampon à pH 4,6 : acide acétique — acétate de sodium.

A 4 g de soude dissoute dans 40 ml d'eau distillée, on ajoute 11,8 ml d'acide acétique cristallisable. On ajuste à 100 ml après refroidissement.

4 — Solution normale de soude.

5 — Réactif dinitrosalicylique : acide 3-5 dinitrosalicylique pur (MERCK) selon SUMNER et SOMERS (1944).

c) *Technique.*

1° *Détermination de la densité optique donnée par 0,5 mg de glucose avec le réactif dinitrosalicylique.*

Dans un tube à essai de 18 × 180 mm jaugé à 25 ml, on met :
— 1 ml de solution de glucose à 0,5 mg par ml ;
— 1 ml d'eau distillée ;
— 1 ml de soude normale.

On agite, puis on verse 3 ml de réactif dinitrosalicylique. On fait un témoin en remplaçant la solution de glucose par 1 ml d'eau distillée. On porte les deux tubes au bain-marie bouillant pendant cinq minutes. On les retire et on les refroidit sous un courant d'eau. On ajuste à 25 ml. On agite par retournement deux à trois fois. Après dix minutes, on mesure ensuite la densité optique, par rapport au témoin, avec un spectrophotomètre, à 540 mμ de longueur d'ondes.

2° *Détermination de l'activité cellulasique.*

La solution enzymatique obtenue après filtration est diluée. Il faut faire trois dilutions convenables de manière à obtenir dans les conditions expérimentales décrites des densités optiques encadrant celle donnée par 0,5 mg de glucose.

Dans deux tubes de 18 × 180 mm jaugés à 25 ml, on met :
— 1 ml de substrat ;
— 1 ml de solution enzymatique.

On agite les deux tubes ; l'un est porté au bain-marie à 37° pendant une heure ; dans l'autre, qui est le témoin, on ajoute 1 ml de soude normale et 3 ml de réactif dinitrosalicylique et on le porte cinq minutes dans l'eau bouillante. Après refroidissement sous un courant d'eau, on l'ajuste à 25 ml et on agite par retournement deux à trois fois. Après une heure d'incubation, on retire le tube essai du bain-marie et on y ajoute 1 ml de soude normale et 3 ml de réactif dinitrosalicylique ; après l'avoir porté cinq minutes au bain-marie bouillant, on le refroidit, on l'ajuste à 25 ml et on agite par retournement.

Les mêmes opérations sont faites avec les autres dilutions enzymatiques.

Après dix minutes, on mesure la densité optique par rapport au témoin du contenu de tous les tubes, comme dans le cas d'une solution de glucose.

d) *Interprétation des résultats.*

On porte les résultats sur un graphique :
— en abscisses les dilutions enzymatiques ;
— en ordonnées les densités optiques.

On trace la courbe représentant l'activité enzymatique qui est sensiblement alignée sur l'origine (dans le cas des densités optiques comprises entre 0 et 0,300). Au point de l'axe des ordonnées correspondant à la densité optique due à 0,5 mg de glucose, on trace la parallèle à l'axe des abscisses : à partir du point de rencontre de cette droite et de la courbe d'activité enzymatique, on abaisse la perpendiculaire à l'axe des abscisses. On obtient ainsi la dilution correspondant à une unité cellulasique. On en déduit le titre de la solution enzymatique exprimé en unités par ml.

Exemple

Soit à déterminer le titre d'un filtrat de culture.

a) *Dilution enzymatique.*

Le filtrat de culture étant considéré comme solution-mère, on effectue les dilutions convenables pour avoir des densités optiques encadrant celle du témoin. Si avec les dilutions employées on obtient des valeurs trop élevées (c'est-à-dire si la plus faible est égale ou supérieure à celle du témoin glucose) il faut refaire le dosage en utilisant des dilutions plus poussées.

b) *Solution de glueose à 0,500 mg/ml.*

Densité moyenne obtenue : 0,240.

c) *Dosages.*

Dilution enzymatique	Densité optique
—	—
1/2 soit 500 p. 1000	0,440
1/4 soit 250 p. 1000	0,260
1/10 soit 100 p. 1000	0,110

d) *Interprétation des résultats.*

Sur le graphique ci-dessous (voir fig. 1). on porte en ordonnées les densités optiques, et en abscisses les dilutions enzymatiques. On trace la courbe représentant l'activité enzymatique. Par ailleurs, à la densité optique de 0,240 représentant une unité, soit 0,500 mg de glucose, on trace la paralléle à l'axe des abscisses. Le point d'intersection des deux courbes correspond donc à une unité pour une dilution enzymatique de 0, 225 ml par ml (225 p. 1000).

Donc il y a $1 \times \frac{1\,000}{225} = 4{,}44$ unités par ml de filtrat de culture.

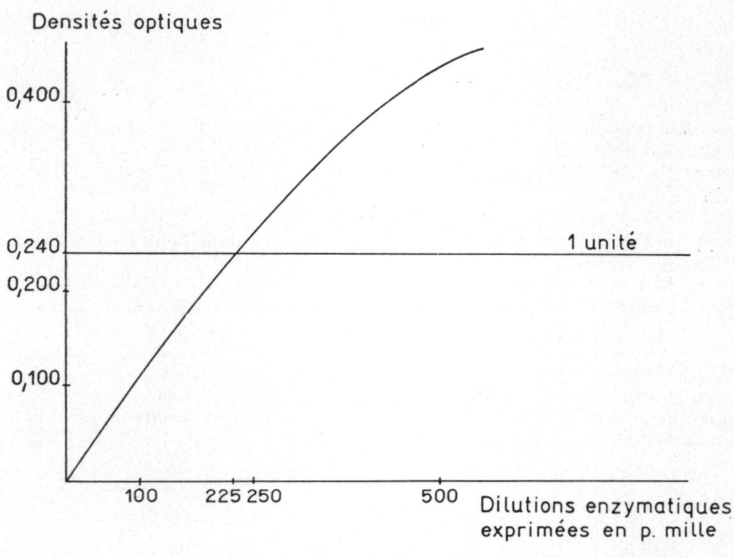


FIG. 1. — *Détermination du titre d'une solution enzymatique exprimé en unités cellulasiques* [*une unité correspond à la densité optique due à 0,5 mg de glucose avec le réactif dinitrosalicylique* (SUMERS et SOMNER, 1944)].

La technique décrite permet de doser les cellulases exo-cellulaires. Il est intéressant de rechercher s'il y a des cellulases endocellulaires en fin de culture. Pour ce faire, on utilise un broyeur à billes (MICKLE — Gomshall — Surrey — Angleterre). La culture est centrifugée. Le culot microbien est repris par de l'eau distillée et centrifugé à nouveau, ceci deux à trois fois. Le dernier culot microbien est remis dans de l'eau distillée jusqu'à ce que l'on obtienne une suspension assez dense. Dans les deux tubes de verre de l'appareil, on met environ 1/3 de très fines perles de verre et 1/3 de suspension microbienne. On bouche, on introduit les tubes dans deux étuis métalliques dont on visse les convercles, et on règle l'appareil le sde telorte que l'agi- tation soit au maximum. On laisse l'appareil en marche dans une chambre froide jusqu'à ce que toutes les cellules soient brisées, ce qui se vérifie par un examen microscopique. Les cellulases étant solubles dans l'eau, le dosage des cellulases endocellulaires se fait dans le surnageant après centrifugation.

4° Mesure de la cellulose disparue.

L'action la plus typique des véritables Bactéries cellulolytiques étant leur pouvoir de transformer tous les types de cellulose (native ou dégradée) en produits solubles, il est intéressant de déterminer la perte de poids de la cellulose au cours de l'hydrolyse, quand on a réalisé les meilleures conditions d'obtention des cellulases. On mesure donc la quantité de cellulose insoluble restant après l'action enzymatique de la façon suivante :

On prélève une partie aliquote de la culture après homogénéisation. On ajoute NaOH N de façon à obtenir une solution à 0,25 N. On porte trente minutes à 100° dans un bécher. On filtre sur verre fritté n° 4. On rince à l'eau chaude et on entraîne dans le même bécher avec CLH 0,25 N. On fait bouillir trente minutes. On filtre sur un double filtre sans cendres. On rince six fois à l'eau chaude, une fois avec CLH 0,25 N, et six fois à l'eau, puis on sèche à 100° à poids constant. On pèse, on incinère, on repèse et on en déduit les cendres. Par comparaison avec un témoin non ensemencé, on détermine le pourcentage de cellulose détruite.

5° Recherche des protéases en fin de culture.

a) *Principe.*

La méthode est inspirée de celle de Kunitz (1960). Le substrat utilisé est la caséine. Les protéases libèrent des produits d'hydrolyse non précipitables par l'acide trichloracétique, et donnant avec le réactif de Folin-Ciocalten une coloration mesurée au spectrophotomètre à 650 mμ de longueur d'ondes.

b) *Réactifs.*

1° Caséine lactique (Merck n° 2 242).

On fait dissoudre 1 g de caséine dans 100 ml de tampon phosphate M/10 à pH 7,7. On porte au bain-marie bouillant pendant dix minutes et on répartit aseptiquement dans des tubes de 20 × 200 mm.

2° Tampon phosphate M/10, pH 7,7.

3° Solution d'acide trichloracétique à 5 p.100.

4° Solution de soude 0,2 N.

5° Réactif de Folin-Ciocalten (1927).

Au moment de l'emploi, on dilue une partie de ce réactif dans deux parties d'eau distillée.

6° Solution de carbonate de soude à 40 p.100.

7° Solution de L (—) tyrosine à 10 μg/ml.

On dissous 10 mg de tyrosine dans 1 000 ml d'eau distillée contenant 1 ml d'acide sulfurique normal.

c) *Technique.*

1. *Détermination de la densité optique donnée par une solution de 10 μg/ml de tyrosine avec le réactif de* Folin-Ciocalten.

On met dans un tube à essai :

5 ml de soude 0,2 N ;

1 ml de solution de tyrosine à 10 μg/ml ;

1 ml de réactif de Folin dilué au 1/3 ;

1 ml de solution de carbonate de sodium.

On agite. On laisse la coloration se développer pendant exactement vingt minutes. On fait la lecture au spectrophotomètre à 650 m μ de longueur d'ondes par rapport à un témoin, la tyrosine étant alors remplacée par de l'eau distillée.

2. *Détermination de l'activité protéolytique,*

La solution enzymatique obtenue après filtration est diluée. Il faut faire trois dilutions convenables de manière à obtenir dans les conditions expérimentales des densités optiques encadrant celle donnée par 10 μg de tyrosine.

Pour chaque dilution enzymatique, on prépare deux tubes à centrifuger d'un volume de 6 ml environ, et on y verse exactement 4 ml d'acide trichloracétique. Dans un tube à hémolyse on met :

1 ml de caséine à 1 p. 100 ;

1 ml de solution tampon à pH 7,7 ;

1 ml de la dilution enzymatique.

On agite rapidement et on prélève 1 ml de ce mélange que l'on verse dans un des tubes contenant de l'acide trichloracétique (tube témoin). On agite par retournement. Les 2 ml restant dans le tube à hémolyse sont portés très exactement vingt minutes à 37°. On prélève alors 1 ml du tube incubé que

l'on verse dans le deuxième tube d'acide trichloracétique (essai). Après trente minutes les deux tubes sont centrifugés cinq minutes à 5000 tours/mn.

On a préparé, par ailleurs, deux tubes de 16 × 160 mm contenant 5 ml de soude 0,2 N. On prélève dans chacun des tubes centrifugés 1 ml du liquide surnageant que l'on met dans chacun des tubes de 16 × 160 mm correspondants. On agite et on ajoute rapidement 1 ml de réactif de Folin, puis, après agitation, 1 ml de la solution de carbonate de sodium. Après vingt minutes, on fait la lecture au spectrophotomètre dans les mêmes conditions, et on note la densité optique obtenue (différence entre la densité optique de l'échantillon incubé et la densité optique de l'échantillon non incubé).

Il est possible de faire un graphique comme dans le cas du dosage de la cellulase pour calculer le titre de la solution enzymatique si c'est nécessaire.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

La cellulase telle que nous l'avons définie, c'est-à-dire décomposant les chaînes de la cellulose par hydrolyse des liaisons β-1-4 glucosidiques, et dont l'activité est mesurée par la production de sucres réducteurs à partir de la carboxy-méthyl-cellulose, est une exo-enzyme complexe synthétisée par toutes les Bactéries cellulolytiques aérobies que nous avons isolées. En effet nous n'avons jamais trouvé trace de cellulase endo-cellulaire que ce soit au début ou à la fin de la culture des trois souches retenues.

Nous avons étudié l'action de divers facteurs sur la production de cellulase par ces Bactéries : durée d'incubation, température, pH, aération, source d'azote, source de carbone, présence de facteurs de croissance. Étant donné qu'au cours de leur métabolisme, elles ont tendance à alcaliniser le milieu, il est important de tamponner leurs milieux de cultures, d'où la nécessité d'étudier l'influence de la concentration molaire du tampon phosphate sur la production de cellulase. D'autre part, comme il apparait que la cellulase bactérienne est une enzyme adaptative, alors que le substrat inducteur, la cellulose, est insoluble, on se demande quels sont les inducteurs naturels de l'enzyme.

Mais l'action la plus typique des Bactéries cellulolytiques est leur pouvoir de transformer tous les types de cellulose en produits solubles. On déterminera donc le pourcentage de cellulose détruite à la fin de la culture, après avoir réalisé les conditions permettant d'obtenir la plus grande quantité de cellulase.

Rappelons que cette étude est faite avec trois souches représentatives de l'ensemble des Bactéries cellulolytiques aérobies isolées du sol, choisies d'après leur pouvoir cellulolytique (Rivière, 1961) : *Cytophaga aurantiaca A*, *Sporocytophaga myxococcoides B* et *Cellulomonas flavigena C*.

1° Action de la durée d'incubation.

On emploie le milieu suivant :

Cellulose en poudre	5 g	
Bacto-tryptone DIFCO	2 g	
Extrait de levure DIFCO	0,5 g	
Hydrolysat de caséine DIFCO	0,5 g	
$NaNO_3$	1 g	
$MgSO_4$, $7H_2O$	0,5 g	
$FeSO_4$, $7H_2O$	0,05 g	
$MnSO_4$, H_2O	0,002 g	
$CaCl_2$, $2H_2O$	0,2 g	
Na_2 HPO_4, $2H_2O$	2,37 g	Tampon M/75 pH 6,8
KH_2 PO_4	1,81 g	
Eau distillée	q.s.p. 1 litre	

On stérilise 20 minutes à 120°. On ajoute ensuite 5 ml d'une solution à 10 p. 100 de glucose stérilisée par filtration. Le milieu est réparti à raison de 100 ml dans des fioles Erlenmeyer de 500 ml, en cultures agitées à 30°.

Les résultats sont résumés dans le tableau I après avoir dosé les cellulases produites tous les deux jours pendant vingt et un jours. On voit très nettement que la synthèse de cellulase est un phénomène lent, même dans le cas de *Cellulomonas flavigena C* dont la croissance est beaucoup plus rapide que celle de *Sporocytophaga myxococcoides B* ou de *Cytophaga aurantiaca A*. Il faut au moins cinq jours d'incubation avant de pouvoir déceler une quantité notable d'enzyme. La plus grande quantité de cellulase produite n'apparaît jamais avant quinze jours d'incubation dans des cultures agitées à 30°. Si l'on attend plus longtemps, le taux semble décroître légèrement, ce qui peut laisser penser qu'il y a une destruction de cellulase par des protéases libérées à la fin de la culture. En fait nous n'avons jamais pu mettre de protéases en évidence dans les filtrats de culture de ces trois souches. Il s'agit probablement d'une action liée à des variations de potentiel d'oxydo-réduction du milieu sur la stabilité de l'enzyme.

TABLEAU I

Action de la durée d'incubation sur la production de cellulase.

(Cultures agitées à 30°)

Durée d'incubation en jours	Production de cellulase en unités par ml		
	Cytophaga aurantiaca A	*Sporocytophaga myxococcoides B*	*Cellulomonas flavigena C*
5	1,2	1,2	2,3
7	1,5	1,7	4,3
9	2,6	3,5	5,5
11	5,0	4,5	9,0
13	5,5	4,8	10,0
15	6,2	7,1	12,5
17	6,2	7,1	12,5
19	5,8	5,5	10,0
21	5,2	4,8	10,0

2° Action de la température.

On emploie le milieu suivant :

Cellulose en poudre	5 g	
Bacto-tryptone DIFCO	2 g	
Extrait de levure DIFCO	0,5 g	
Hydrolysat de caséine DIFCO	0,5 g	
$NaNO_3$	1 g	
$MgSO_4$, $7H_2O$	0,5 g	
$FeSO_4$, $7H_2O$	0,05 g	
$MnSO_4$, H_2O	0,002 g	
$CaCl_2$, $2H_2O$	0,2 g	
Na_2HPO_4, $2H_2O$	2,37 g	Tampon M/75 pH 6,8
KH_2PO_4	1,81 g	
Eau distillée	q.s.p. 1 litre	

On stérilise 20 minutes à 120°. On ajoute ensuite 5 ml d'une solution à 10 p. 100 de glucose stérilisée par filtration. Le milieu est réparti à raison de 100 ml dans des fioles Erlenmeyer de 500 ml, en cultures agitées, à différentes températures.

Les résultats sont résumés dans le tableau 2. On voit que la plus grande quantité de cellulase produite apparaît quand la température d'incubation est d'environ 30°. A 25°, *Sporocytophaga myxococcoides B* et *Cytophaga aurantiaca A* synthétisent encore une quantité assez importante de cellulase, alors que *Cellulomonas flavigena C* ne donne pratiquement rien. A 35° toutes les souches étudiées ne libèrent presque plus de cellulase.

TABLEAU 2

Action de la température sur la production de cellulase

(Cultures agitées)

Température d'incubation	Production de cellulase en unités par ml					
	Cytophaga aurantiaca A après une incubation de :		*Sporocytophaga myxococcoides B* après une incubation de :		*Cellulomonas flavigena C* après une incubation de :	
	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours
25°	2,0	4,0	2,0	3,5	0,1	0,5
30°	2,0	5,3	2,1	5,2	2,6	12.5
35°	1,5	0	1,2	0	1,1	0

3° Action du pH.

On prépare les solutions suivantes :

a) *Milieu à concentration double*

Cellulose en poudre	10 g
Bacto-tryptone DIFCO	4 g
Extrait de levure DIFCO	1 g
Hydrolysat de caséine DIFCO	1 g
$NaNO_3$	2 g
$MgSO_4$, $7H_2O$	1 g
$FeSO_4$, $7H_2O$	0,1 g
$MnSO_4$, H_2O	0,004 g
$CaCl_2$, $2H_2O$	0,4 g
Eau distillée	q.s.p. 1 litre

Le pH est ajusté à 7,0 avec NaOH N. On stérilise 20 minutes à 120°. On ajoute ensuite 10 ml d'une solution à 10 p. 100 de glucose stérilisée par filtration.

b) *Une solution M/15 de phosphate monopotassique* (9,078 g par litre de KH_2PO_4),

c) *Une solution M/15 de phosphate disodique* (11, 876 g par litre de Na_2HPO_4, $2H_2O$).

La répartition se fait comme il est indiqué dans le tableau 3, à différents pH, de telle sorte que la concentration molaire finale du tampon phosphate soit M/30 et qu'il y ait au total 100 ml par fioles Erlenmeyer de 500 ml. Les cultures sont incubées à 30° et agitées.

Les résultats sont résumés dans le tableau 3 et la figure 2. On voit clairement que la zone de pH permettant une production de cellulase est relativement étroite, comprise entre pH 5,6 et pH 8,0, le pH optimal étant 6,8 dans le cas de *Cellulomonas flavigena C* et 7,0 dans celui de *Sporocytophaga myxococcoides B* et de *Cytophaga aurantiaca A*.

TABLEAU 3

Action du pH *sur la production de cellulase.*
(Cultures agitées à 30°)

Milieu à concentration double en ml.	Solution de KH_2PO_4 M/15 en ml	Solution de Na_2H, PO_4 $2H_2O$ M/15 en ml.	pH initial	Production de cellulase en unités par ml					
				Cytophaga aurantiaca A après une incubation de		*Sporocytophaga myxococcoides B* après une incubation de		*Cellulomonas flavigena C* après une incubation de	
				7 jours	15 jours	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours
50	47,5	2,5	5,6	0	0	0	0,20	0	0
50	45,0	5,0	5,9	1,40	3,85	0	0,50	1,10	1,40
50	35,0	15,0	6,4	1,50	3,85	0,90	1,80	2,00	9,20
50	25,0	25,0	6,8	1,90	5,90	1,80	3,10	1,85	12,50
50	19,5	30,5	7,0	2,20	6,20	2,30	5,00	2,20	11,10
50	14,0	36,0	7,2	2,05	5,90	2,00	3,40	2,15	10,00
50	5,5	44,5	7,7	1,10	2,25	1,50	2,05	2,00	9,90
50	2,5	47,5	8,0	0	0	0	0,40	2,00	4,00

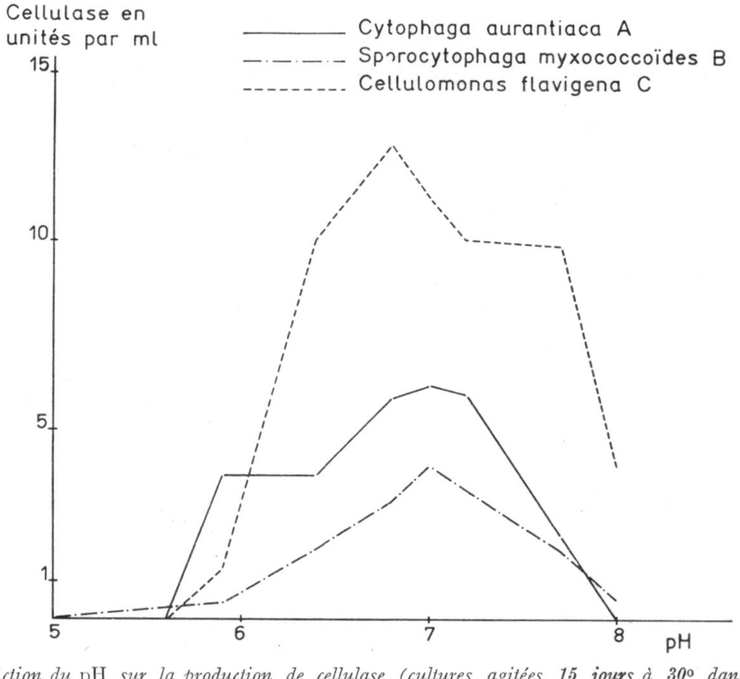


FIG. 2. — *Action du* pH *sur la production de cellulase (cultures agitées* **15** ***jours*** *à* **30°** ***dans différents*** *tampons phosphates* M/30*).*

Comme le montre REESE (1947) les pH optimals correspondant non plus à la production de cellulase, mais au pourcentage de cellulose détruite (mesurée par la perte de poids) ne sont pas les mêmes. En effet, il trouve deux valeurs distinctes, soit pH 6,5 pour *Sporocytophaga myxococcoides* et pH 7,5 pour *Cellulomonas* sp.

Ceci s'explique par le fait que les pH optimals varient aussi avec la composition du milieu, ce qui rend difficile les comparaisons. Ainsi REESE (1947) limite l'incubation à sept jours à 30° dans un milieu faiblement tamponné (tampon phosphate M/100) de constitution différente : il n'y a pas de substances organiques autres que la cellulose dans le cas de *Sporocytophaga myxococcoides*, alors que *Cellulomonas* sp est ensemencé dans un milieu contenant à la fois de l'urée, de la gélatine et de l'extrait de levure. Nous verrons que ces conditions ne sont pas les plus favorables à la production de cellulase par ces Bactéries.

4° ACTION DE L'AÉRATION.

On emploie le milieu suivant :

Cellulose en poudre	5 g	
Bacto-tryptone DIFCO	2 g	
Extrait de levure DIFCO	0,5 g	
Hydrolysat de caséine DIFCO	0,5 g	
$NaNO_3$	1 g	
$MgSO_4$, $7H_2O$	0,5 g	
$FeSO_4$, $7H_2O$	0,05 g	
$MnSO_4$, H_2O	0,002 g	
$CaCl_2$, $2H_2O$	0,2 g	
Na_2HPO_4, $2H_2O$	2,37 g	Tampon M/75 pH 6,8
KH_2PO_4	1,81 g	
Eau distillée	q.s.p. 1 litre	

TABLEAU 4

Action de l'aération sur la production de cellulase.
(Incubation à 30°)

Aération des cultures	Production de cellulase en unités par ml					
	Cytophaga aurantiaca A après une incubation de		*Sporocytophaga myxococcoides B* après une incubation de		*Cellulomonas flavigena C* après une incubation de	
	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours
Cultures stationnaires	0,35	0,35	0	0	0	1,10
Cultures agitées dans un shaker	2,20	5,00	3,50	4,00	4,70	7,70
Cultures aérées dans un fermenteur : 1,7 l d'air par minute et par litre de culture	5,00	—	5,00	—	9,00	—
2,3 l d'air par minute et par litre de culture	5,00	—	5,00	—	16,50	—
3 l d'air par minute et par litre de culture	5,00	—	5,00	—	23,50	—

On stérilise 20 minutes à 120°. On ajoute ensuite 5 ml d'une solution à 10 p. 100 de glucose stérilisée par filtration. Le milieu est reparti soit dans des fioles Erlenmeyer de 500 ml à raison de 100 ml par fiole, en cultures stationnaires ou agitées dans un shaker, soit dans des fermenteurs d'assez grande capacité (3 litres) et aérés par injection d'air. L'incubation se fait à 30°.

Les résultats sont résumés dans le tableau 4. On voit qu'en présence d'une aération importante *Cytophaga aurantiaca A* et *Sporocytophaga myxococcoides B* produisent une quantité notable de cellulase limitée cependant à 5 unités par ml. Ces souches étant aérobies stricts, ces résultats n'ont rien de surprenant.

Par contre, dans le cas de *Cellulomonas flavigena C*, anaérobie facultatif, il est curieux de remarquer que la synthèse de cellulase s'accroît avec l'aération, alors qu'elle est presque nulle dans les cultures stationnaires.

Ce qui semble en contradiction avec les observations de REESE (1947) : dans des fioles scellées, la décomposition de la cellulose augmente quand le volume d'air diminue dans les fioles. Mais les différences ne sont pas très importantes (19 à 27 p. 100 de perte de poids de la cellulose) et peuvent être dues aux erreurs d'expérience. S'il s'agit de fioles agitées, le pourcentage de la cellulose détruite s'accroît et atteint 65 p. 100.

Avec une bonne aération (3 litres d'air par minute et par litre de culture) *Cellulomonas flavigena C* libère presque cinq fois plus de cellulase que les deux autres souches.

5° INFLUENCE DE LA SOURCE D'AZOTE

On prépare les solutions suivantes :

a) *Milieu à concentration double.*

Cellulose en poudre	10 g	
$MgSO_4$, $7H_2O$	1 g	
$FeSO_4$, $7H_2O$	0,1 g	
$MnSO_4$, H_2O	0,004 g	
$CaCl_2$, $2H_2O$	0,4 g	
Na_2HPO_4, $2H_2O$	4,73 g	Tampon 2M/75
KH_2PO_4	3,62 g	pH 6,8
Eau distillée	q.s.p. 1 litre	

On stérilise 20 minutes à 120°. On ajoute ensuite 10 ml d'une solution à 10 p. 100 de glucose stérilisée par filtration. Le milieu est réparti à raison de 50 ml dans des fioles Erlenmeyer de 500 ml.

b) *Différentes sources d'azote en solution aqueuse*

Solution 1 p. 100 Nitrate de Sodium.
Solution 1 p. 100 Urée.
Solution 2 p. 100 Bacto-tryptone DIFCO.
Solution 0,5 p. 100 Extrait de levure DIFCO.
Solution 0,5 p. 100 Hydrolysat de caséine DIFCO.
Solution 0,5 p. 100 Gélatine.
Solution 1 p. 100 Extrait de viande LIEBIG.

Ces solutions sont stérilisées par la chaleur ou par filtration et ajoutées aseptiquement dans les fioles de telle sorte qu'il y ait un volume total de 100 ml et que la

concentration finale corresponde aux indications données dans le tableau 5. La teneur en azote est sensiblement la même dans tous les cas, environ 0,5 g par litre, sauf dans dans la première expérience quand il n'y a que 0,1 p. 100 de Nitrate de Sodium.

TABLEAU 5

Influence de la source d'azote sur la production de cellulase.

(Cultures agitées à 30°)

Source d'azote							Production de cellulase en unités par ml					
$NaNO_3$	Urée	Peptones	Extrait de viande	Extrait de levure	Gélatine	Hydrolysat de caséine	*Cytophaga aurantiaca A* après une incubation de		*Sporocytophaga myxococcoides* après une incubation de		*Cellulomonas flavigena C* après une incubation de	
%	%	%	%	%	%	%	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours
0,1							1,5	2,7	2,3	3,3	0,3	0,8
0,3							1,6	4,1	2,0	4,0	0,6	1,8
	0,1						1,5	4,3	1,4	3,2	0,8	1,8
0,1		0,2					1,8	4,5	2,1	4,5	2,3	3,1
0,1		0,2		0,05			1,5	4,5	2,4	4,7	2,4	5,3
0,1		0,2	0,2	0,05			1,6	4,2	2,4	4,1	3,3	5,3
0,1		0,2		0,05		0,05	1,6	5,5	2,4	4,7	8,0	14,3
0,1		0,2		0,05	0,005		1,4	4,1	2,4	4,5	2,3	4,1

Les résultats sont tout à fait concluants : *Cytophaga aurantiaca A* et *Sporocytophaga myxococcoides B* produisent toujours la même quantité de cellulase s'il y a suffisamment d'azote, quelle que soit la source d'azote (minérale ou organique). Au contraire *Cellulomonas flavigena C* nécessite de l'azote organique (peptones) enrichi en extrait de levure et en hydrolysat de caséine, l'extrait de viande ou la gélatine ne pouvant remplacer celui-ci. Ces résultats sont en accord avec ceux de STANIER (1942) relatifs à la croissance des *Cytophaga* et des *Sporocytophaga,* mais diffèrent des conclusions de REESE (1947) pour qui l'urée est la meilleure source d'azote pour la croissance et la cellulolyse des *Cellulomonas.*

6° INFLUENCE DE LA SOURCE DE CARBONE

On prépare les solutions suivantes :

a) *Milieu à concentration double*

$NaNO_3$	2 g	
$MgSO_4$, $7H_2O$	1 g	
$FeSO_4$, $7H_2O$	0,1 g	
$MnSO_4$, H_2O	0,004 g	
$CaCl_2$, $2H_2O$	0,4 g	
Na_2HPO_4, $2H_2O$	4,73 g	Tampon 2M/75
KH_2PO_4	3,62 g	pH 6,8
Bacto-tryptone DIFCO	4 g	
Extrait de levure DIFCO	1 g	
Hydrolysat de caséine DIFCO	1 g	
Eau distillée	q.s.p. 1 litre	

On stérilise 20 minutes à 120°. Le milieu est réparti à raison de 50 ml dans des fioles Erlenmeyer de 500 ml.

b) *Différentes sources de carbone en solution aqueuse ou en suspension dans l'eau.*

— Cellulose en poudre en suspension dans l'eau.
— Solution à 5 p. 100 de carboxy-méthyl-cellulose (Blanose RP 210 NOVACEL).
— Solution à 5 p. 100 de carboxy-méthyl-cellulose (LOW 7 L HERCULES POWDER)
Ces deux solutions sont stérilisées 20 minutes à 120°.
— Des solutions de glucides stérilisées par filtration :
glucose, fructose, saccharose, lactose, mannitol à 10 p. 100.
cellobiose, glycérine, amidon soluble à 1 p. 100.

On ajoute aseptiquement la source de carbone de telle sorte que le volume total soit de 100 ml et que la concentration finale corresponde aux indications données dans le tableau 6.

Les résultats résumés dans ce tableau permettent de voir que la cellulase est une enzyme adaptative quelle que soit la souche étudiée, contrairement à ce qui avait été signalé par HAMMERSTROM et al. (1955) dans le cas des *Cellulomonas*. En particulier, malgré de nombreux essais, nous n'avons jamais pu déceler de traces de cellulase dans les cultures de *Cellulomonas flavigena C* contenant du mannitol comme seule source de carbone, bien qu'il y ait une excellente croissance.

Dans tous les cas, la plus grande quantité de cellulase apparaît quand il y a au moins 0,5 p. 100 de cellulose. Au dessus de 1 p. 100, *Cellulomonas flavigena C* produit déjà moins de cellulase.

On peut remplacer la cellulose par de la carboxy-méthyl-cellulose d'origine variée (Blanose RP 210 NOVACEL ou LOW 7L HERCULES POWDER), mais les taux de production sont bien moins élevés.

On remarque un phénomène curieux dans le cas de *Cytophaga aurantiaca A* et de *Sporocytophaga myxococcoides B* : quand leur concentration est faible, le glucose et le cellobiose permettent la synthèse de cellulase. Depuis longtemps STANIER (1942) et FAHRAEUS (1947-1949) ont démontré que le glucose, à faible concentration et à la condition d'être stérilisé par filtration, est un bon aliment carboné pour la croissance de ces deux souches. Si la concentration s'accroît, la croissance s'arrête, sans que l'on sache pourquoi, *Sporocytophaga myxococcoides* pouvant supporter des teneurs plus élevées en glucose. Dans ces conditions, on pourrait penser que ces Bactéries ont des cellulases constitutives.

En fait nous verrons un peu plus tard qu'il est possible d'admettre que le glucose et le cellobiose se comportent comme des inducteurs. Cette théorie de MANDELS et REESE (1960) est basée sur les résultats d'une expérimentation faite avec divers Champignons cellulolytiques et paraît s'appliquer aussi à *Cytophaga aurantiaca A* et à *Sporocytophaga myxococcoides B*. La cellulose est un substrat insoluble, ce sont les produits solubles de l'action enzymatique (glucose et cellobiose) qui agissent comme les inducteurs naturels de la cellulase. De petites quantités d'enzyme adaptative sont produites même en l'absence de cellulose. Quand celle-ci est présente, elle est hydrolysée, les produits solubles pénètrent à l'intérieur des cellules microbiennes et induisent la synthèse d'une quantité plus importante de cellulase. Les rendements plus faibles en enzyme que l'on observe dans les cultures faites en présence de glucose et de cellobiose s'expliquent par le fait que ces glucides exercent un effet inhibiteur qui

TABLEAU 6

Influence de la source de carbone sur la production de cellulase
(cultures agitées à 30°)

Source de carbone										Production de cellulase en unités par ml.					
										Cytophaga aurantiaca A après une incubation de		*Sporocytophaga myxococcoides B* après une incubation de		*Cellulomonas flavigena C* après une incubation de	
Cellulose %	Carboxy-méthyl-Cellulose %	Glucose %	Fructose %	Cellobiose %	Saccharose %	Lactose %	Mannitol %	Glycérine %	Amidon soluble %	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours
0,1		0,05								1,0	2,1	1,4	1,8	2,2	4,0
0,5		0,05								1,7	5,1	1,7	5,5	2,6	12,5
1		0,05								1,8	5,3	2,0	5,5	2,8	18,0
2		0,05								2,4	5,3	1,8	5,2	0,8	10,0
	B 0,5									1,4	1,8	2,0	2,4	1,0	1,5
	HP 0,5									0,9	1,9	2,2	2,4	1,1	1,7
		0,1								0,2	1,5	1,0	1,5	0	0
		0,5								0	0	2,1	3,0	0	0
		2,5								0	0	0	0	0	0
			0,1							0	0	0	0	0	0
			0,5							0	0	0	0	0	0
			2,5							0	0	0	0	0	0
				0,1						0,1	1,2	1,3	2,0	0	0
				0,5						0	0	2,1	4,0	0	0
				2,5						0	0	0	0	0	0
					0,1					0	0	0	0	0	0
					0,5					0	0	0	0	0	0
						0,1				0	0	0	0	0	0
						0,5				0	0	0	0	0	0
							0,1			0	0	0	0	0	0
							0,5			0	0	0	0	0	0
								0,1		0	0	0	0	0	0
								0,5		0	0	0	0	0	0
									0,1	0	0	0	0	0	0
									0,5	0	0	0	0	0	0
0,5										1,7	4,7	1,9	4,5	1,9	7,5

B = Blanose RP 210 Novacel.
HP = Low 7 L Hercules Powder.

bloque la croissance quand leur concentration s'élève. D'ailleurs l'action inhibitrice des oses, particulièrement du glucose, sur l'induction des enzymes est un fait connu (COHN, 1956 ; NEIDHART et MAGASANIK, 1957) sans que l'on puisse trouver une explication satisfaisante (JEUNIAUX, 1958).

Les autres glucides ne donnent lieu à aucune production de cellulase, même s'ils permettent une bonne croissance.

7° ACTION DES FACTEURS DE CROISSANCE.

On prépare les solutions indiquées :

a) *Milieu à concentration double*

Cellulose en poudre	10 g	
Bacto-tryptone DIFCO	4 g	
$NaNO_3$	2 g	
$MgSO_4$, $7H_2O$	1 g	
$FeSO_4$, $7H_2O$	0,1 g	
$MnSO_4$, H_2O	0,004 g	
$CaCl_2$, $2H_2O$	0,4 g	
Na_2HPO_4, $2H_2O$	4,73 g	Tampon 2M/75
KH_2PO_4	3,62 g	pH 6,8
Eau distillée	q.s.p. 1 litre	

On stérilise 20 minutes à 120°. On ajoute ensuite 10 ml d'une solution à 10 p. 100 de glucose stérilisée par filtration. Le milieu est réparti à raison de 50 ml dans des fioles Erlenmeyer de 500 ml.

b) *Une solution de gélatine à* 0,3 p. 100 *dans l'eau distillée.*

c) *Une solution des vitamines suivantes* :

Aneurine	100 mg
Biotine	0,4 mg
Acide nicotinique	100 mg
Pyridoxine	250 mg
Pantothénate de calcium	100 mg
Acide p. aminobenzoïque	20 mg
Acide folique	1 mg
Riboflavine	50 mg
Eau distillée	q.s.p. 1 litre

d) *Une solution complexe d'acides aminés contenant* :

l cystéine	250 mg
dl alanine	250 mg
l proline	250 mg
l asparagine	250 mg
l acide glutamique	250 mg
dl acide aspartique	250 mg
l arginine	250 mg
l leucine	250 mg
Glycine	250 mg
dl lysine	250 mg
Eau distillée	q.s.p. 1 litre

e) *Une solution d'extrait de levure* DIFCO *à* 0,5 p. 100 *dans l'eau distillée.*

Ces solutions sont stérilisées par filtration et ajoutées aseptiquement dans les fioles de telle sorte que le volume total soit de 100 ml et que la concentration finale corresponde aux indications données dans le tableau 7.

TABLEAU 7

Action des facteurs de croissance sur la production de cellulase.

(Cultures agitées à 30°)

Facteurs de croissance				Production de cellulase en unités par ml					
Solution de vitamines en ml pour 100 ml de milieu	Solution d'acides aminés en ml pour 100 ml de milieu	Gélatine %	Extrait de levure %	*Cytophaga aurantiaca A* après une incubation de		*Sporocytophaga myxococcoides B* après une incubation de		*Cellulomonas flavigena C* après une incubation de	
				7 jours	15 jours	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours
				1,8	4,5	2,1	4,5	2,3	3,1
			0,05	1,5	4,5	2,4	4,7	2,4	5,3
	10		0,05	1,6	5,5	2,4	4,7	8,0	14,3
1	10		0,05	1,4	5,5	1,6	4,1	12,5	16,6
		0,003	0,03	1,4	4,1	2,4	4,4	2,3	4,1

Les résultats résumés dans le tableau 7 indiquent que *Cytophaga aurantiaca A* et *Sporocytophaga myxococcoides B* ne semblent pas nécessiter de facteurs de croissance, car les différences que l'on peut observer ne paraissent pas significatives. La synthèse de cellulase par ces Bactéries n'est donc pas modifiée par un apport de vitamines du groupe B ou d'acides aminés, ce qui est en accord avec ce que l'on sait de leur biologie (STANIER, 1942 ; REESE, 1947). D'ailleurs FAHRAEUS (1947) signale avoir mis en évidence par un dosage microbiologique une quantité assez importante de thiamine dans les filtrats de culture de *Cytophaga* 3.

Par contre *Cellulomonas flavigena C* produit d'autant plus de cellulase que le milieu est plus riche en facteurs de croissance. Dans les meilleures conditions (vitamines, acides aminés et extrait de levure) le taux de cellulase est élevé, même après seulement huit jours d'incubation, par suite d'une croissance accélérée.

D'après REESE (1947) le pourcentage de cellulose détruite par *Cellulomonas sp.* est le plus fort quand il y a 0,03 p. 100 d'extrait de levure et 0,003 p. 100 de gélatine : ce résultat curieux n'est pas confirmé par le comportement de *Cellulomonas flavigena C* pour qui ces conditions ne favorisent pas du tout la production de cellulase. En effet, on ne voit pas très bien quels facteurs de croissance pourraient être apportés par une gélatine purifiée, surtout à si faible concentration.

8° Action de certains inducteurs

On prépare les solutions suivantes :

a) *Milieu à concentration double* :

Cellulose en poudre	10 g
Bacto-tryptone DIFCO	4 g
Extrait de levure DIFCO	1 g
Hydrolysat de caséine DIFCO	1 g
$NaNO_3$	2 g
$MgSO_4$, $7H_2O$	1 g
$FeSO_4$, $7H_2O$	0,1 g
$MnSO_4$, H_2O	0,004 g
$CaCl_2$, $2H_2O$	0,4 g
Na_2HPO_4, $2H_2O$	4,73 g } Tampon 2M/75
KH_2PO_4	3,63 g } pH 6,8
Eau distillée	q.s.p. 1 litre

On stérilise 20 minutes à 120°. Le milieu est réparti à raison de 50 ml dans des fioles Erlenmeyer de 500 ml.

b) *Différents inducteurs en solution aqueuse* :

— Solution à 5 p. 100 de carboxy-méthyl-cellulose (Blanose RP 210 Novacel).

— Solution à 5 p. 100 de carboxy-méthyl-cellulose (Low 7L Hercules Powder).

Ces deux solutions sont stérilisées 20 minutes à 120°.

— Des solutions de glucides stérilisées par filtration :

glucose, fructose, saccharose, lactose, mannitol à 10 p. 100 ;

cellobiose, amidon soluble à 1 p. 100.

Ces inducteurs sont ajoutés aseptiquement dans les fioles de telle sorte que le volume total soit de 100 ml et que la concentration finale corresponde aux indications données dans le tableau 8.

Avant d'analyser les résultats, rappelons que nous avons vu que la cellulase est une enzyme adaptative des Bactéries cellulolytiques aérobies, mais qu'il y a des différences importantes suivant les souches. Ainsi *Cellulomonas flavigena C* ne produit de cellulase qu'en présence de cellulose ou de carboxy-méthyl-cellulose, alors que *Cytophaga aurantiaca A* et *Sporocytophaga myxococcoides B* peuvent en synthétiser notablement dans un milieu où la seule source de carbone est apportée par du glucose ou du cellobiose à faible concentration. Mandels et Reese (1960), étudiant la production de cellulase par divers Champignons cellulolytiques, ont émis l'hypothèse que les produits solubles de l'action enzymatique agissent comme les inducteurs naturels de la cellulase, puisque la cellulose est insoluble.

Si cette hypothèse est exacte dans le cas des Bactéries cellulolytiques, le fait d'ajouter du glucose ou du cellobiose dans le milieu de culture doit permettre d'élever le taux de production de la cellulase. C'est ce qui est confirmé par la lecture des résultats résumés dans le tableau 8.

Les différences ne sont pas très grandes dans le cas de *Cytophaga A* et de *Sporocytophaga myxococcoides B*, cependant il semble qu'un apport de glucose ou de cellobiose à faible concentration augmente la quantité de cellulase produite. Quand la concentration est plus forte, il y a un effet inhibiteur, plus accentué avec le cellobiose, ce qui est en accord avec les conclusions de Mandels et Reese (1960) relatives aux

TABLEAU 8

Influence des inducteurs sur la production de cellulase
(Cultures agitées à 30°)

Inducteurs									Production de cellulase en unités par ml					
Carboxy-méthyl Cellulose %		Glucose %	Fructose %	Cellobiose %	Saccharose %	Lactose %	Mannitol %	Amidon soluble %	*Cytophaga aurantiaca A* après une incubation de		*Sporocytophaga myxococcoides B* après une incubation de		*Cellulomonas flavigena C* après une incubation de	
B	HP								7 jours	15 jours	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours
0,05									2,3	5,8	1,9	4,9	1,8	4,5
0,5									2,1	5,1	2,1	4,8	1,7	2,5
	0,05								2,2	4,3	2,2	4,5	2,3	5,8
	0,5								2,6	4,7	3,3	5	1,6	3,2
		0,01							1,7	5,8	1,8	4,1	2,0	9,0
		0,05							1,7	7,1	2,4	5,7	2,3	9,5
		0,1							1,7	2,6	1,7	4,5	2,7	12,0
		0,2							0	0	0	0	1,8	12,5
			0,01						1,9	5,8	2,1	4,9	2,0	11,0
			0,05						2,0	5,5	2,3	5,2	2,1	12,0
				0,01					1,7	5,2	2,5	4,9	2,1	10,4
				0,05					1,7	6,5	2,5	5,7	2,4	12,4
				0,1					0	0	2	5	2,3	12,1
				0,2					0	0	0	0	2,2	12,5
					0,01				1,6	5,0	2,4	5,1	2,4	11,5
					0,05				1,7	4,9	2,3	5,0	1,9	11,2
						0,01			1,9	4,8	1,9	4,9	2,1	11,4
						0,05			1,8	5,1	2,1	4,8	2,0	12,9
							0,01		1,7	4,9	2,2	5,0	2,3	12,5
							0,05		2,0	4,8	2,1	4,9	2,4	14,2
								0,01	2,1	4,7	1,9	4,7	2,2	8,2
								0,05	1,9	5,1	2,0	4,9	2,2	9,5
									1,7	4,7	1,9	4,5	1,9	7,5

B = Blanose RP 210 Novacel.
HP = Low 7L Hercules Powder.

Champignons cellulolytiques et avec ce que l'on sait de la biologie de ces Bactéries (STANIER, 1942 ; FAHRAEUS, 1947). En effet *Cytophaga aurantiaca A* est beaucoup plus sensible à cette action inhibitrice que *Sporocytophaga myxococcoides B*. On voit que la plus grande quantité de cellulase est synthétisée quand l'inducteur a une concentration de 0,05 p.100, trop faible pour agir sur le taux de croissance. Ce qui laisse penser que le glucose et le cellobiose se comportent comme des inducteurs vis-à-vis de *Cytophaga aurantiaca A* et de *Sporocytophaga myxococcoides B* pour la synthèse de cellulase.

Lorsqu'il s'agit de *Cellulomonas flavigena C*, le phénomène est différent ; la cellulase est strictement adaptative. L'apport de différents oses à faibles concentration favorise la croissance de cette souche et par suite la synthèse de cellulase, mais il n'apparaît pas que le glucose ou le cellobiose aient une action particulière. Par contre le mannitol, très favorable à la croissance (HAMMERSTROM et al., 1955), permet d'obtenir des rendements élevés en cellulase, quand on l'ajoute dans un milieu contenant de la cellulose.

9° INFLUENCE DE LA CONCENTRATION MOLAIRE DU TAMPON PHOSPHATE.

On prépare les solutions suivantes :

a) *Milieu à concentration double.*

Cellulose en poudre	10 g
Bacto-tryptone DIFCO	4 g
Extrait de levure DIFCO	1 g
Hydrolysat de caséine DIFCO	1 g
$NaNO_3$	2 g
$MgSO_4$, $7H_2O$	1 g
$FeSO_4$, $7H_2O$	0,1 g
$MnSO_4$, H_2O	0,004 g
$CaCl_2$, $2H_2O$	0,4 g
Eau distillée	q.s.p. 1 litre

Le pH est ajusté à 7,0 avec NaOH N. On stérilise 20 minutes à 120°. On ajoute ensuite 10 ml d'une solution à 10 p.100 de glucose stérilisée par filtration.

b) *Une solution 2M/15 de phosphate monopotassique* (18,156 g par litre de KH_2PO_4).

c) *Une solution 2M/15 de phosphate disodique* (23,752 g par litre de Na_2HPO_4, $2\ H_2O$).

La répartition se fait comme il est indiqué dans le tableau 10, à pH 6,8 dans des fioles Erlenmeyer de 500 ml, à raison de 100 ml par fiole. Les cultures sont agitées et incubées à 30°. Les dosages de cellulase sont faits après sept et quinze jours d'incubation.

Les résultats sont résumés dans le tableau 9. On voit que *Cytophaga aurantiaca A* et *Sporocytophaga myxococcoides B* ont tendance à alcaliniser fortement leur milieu de culture ; si la concentration molaire du tampon phosphate est trop élevée, la synthèse de cellulase diminue. *Cellulomonas flavigena C* ne modifie pas le pH du milieu, même s'il est faiblement tamponné. Dans tous les cas, la plus grande quantité de cellulase est produite quand la concentration molaire du tampon phosphate est comprise entre M/30 et M/75.

10° Détermination du pourcentage de cellulose détruite.

On emploie le milieu suivant :

Cellulose en poudre	5 g	
Bacto-tryptone DIFCO	2 g	
Extrait de levure DIFCO	0,5 g	
Hydrolysat de caséine DIFCO	0,5 g	
$NaNO_3$	1 g	
$MgSO_4$, $7H_2O$	0,5 g	
$FeSO_4$, $7H_2O$	0,05 g	
$MnSO_4$, H_2O	0,02 g	
$CaCl_2$, $2H_2O$	0,2 g	
Na_2HPO_4, $2H_2O$	2,37 g	Tampon M/75
KH_2PO_4	1,81 g	pH 6,8
Eau distillée	q.s.p. 1 litre	

On stérilise 20 minutes à 120°. On ajoute ensuite 5 ml d'une solution à 10 p.100 de glucose stérilisée par filtration. Le milieu est réparti à raison de 100 ml dans des fioles Erlenmeyer de 500 ml, en cultures agitées, à 30°.

TABLEAU 9

Influence de la concentration molaire du tampon phosphate (Sörensen).
(Cultures agitées à 30°)

Concentration molaire finale du tampon phosphate	*Cytophaga aurantiaca A*				*Sporocytophaga myxococcoides B*				*Cellulomonas flavigena C*			
	pH terminal		Cellulase produite en unités par ml		pH terminal		Cellulase produite en unités par ml		pH terminal		Cellulase produite en unités par ml	
	temps d'incubation		temps d'incubation		temps d'incubation		temps d'incubation		temps d'incubation		temps d'incubation	
	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours	7 jours	15 jours
M/15	7,0	7,0	2,4	3,2	7,0	7,0	1,2	1,5	7,0	7,0	1,7	4,5
M/30	7,0	7,0	2,2	4,3	7,5	7,5	1,5	4,1	7,0	7,0	2,5	9,5
M/75	7,0	8,0	1,9	5,2	8,0	8,5	1,3	4,5	7,0	7,0	2,6	12,5
M/150	8,0	8,5	1,2	1,8	8,0	9,0	1,2	1,2	7,0	7,0	2,9	12,5

Les résultats sont résumés dans le tableau 10. On voit que le pourcentage de cellulose détruite, dans les conditions permettant d'obtenir la plus grande quantité de cellulase produite par les trois souches retenues, est généralement plus élevé que ceux indiqués par Reese (1947) et Siu (1951) qui ne dépassent jamais 65-70 p.100. Étant donné que les conditions de culture décrites par ces auteurs n'étaient pas les plus favorables à la synthèse de cellulase, on pouvait espérer augmenter le pourcentage de cellulose détruite, après avoir déterminé ces conditions. C'est en effet ce qui s'est produit puisque toute la cellulose a pratiquement disparu après quinze jours d'incubation à 30° avec *Cytophaga aurantiaca A* et *Sporocytophaga myxococcoides B*.

Il faut cependant remarquer que *Cellulomonas flavigena C*, bien que synthétisant plus de cellulase que les deux autres souches, n'arrive pas à solubiliser plus de 45 p.100

de la cellulose, même dans les meilleures conditions. Ce qui laisse penser qu'il y a des différences dans la constitution des cellulases bactériennes suivant les souches employées. C'est ce que nous avions déjà noté dans l'étude de l'action des inducteurs sur la production de cellulase.

Mais le problème qui se pose est celui du choix de la cellulose dans l'expérimentation. En effet, sans entrer dans les détails de sa structure, la cellulose dite native est constituée de longues chaînes formées d'unités de 1-4-β-D glucopyranose polymérisées (REESE, 1959). Or, dans la nature, la cellulose qui répond à la définition

TABLEAU 10

Détermination du pourcentage de cellulose détruite.
(Cultures agitées à 30°)

Durée d'incubation en jours	cellulose détruite en %		
	Cytophaga aurantiaca A	*Sporocytophaga myxococcoides B*	*Cellulomonas flavigena C*
5	80	20	20
7	94	40	28
15	100	100	45

ci-dessus est une exception (POCHON et BARJAC, 1958) ; même la fibre de coton contient de nombreuses impuretés. Dans la plupart des cas, la cellulose est liée à d'autres constituants (lignine,hémicelluloses, pectine, etc.) influant sur sa résistance aux attaques microbiennes. Les celluloses purifiées (papier filtre, tissu) employées au laboratoire ont subi des traitements souvent brutaux, amenant une rupture des chaînes en éléments plus courts, des oxydations, des substitutions. D'autre part la cellulose est insoluble, rendant l'expérimentation délicate. Le meilleur procédé consiste alors à la broyer finement, ce qui raccourcit la longueur des fibres et favorise l'action enzymatique, laissant supposer que la pénétration enzymatique transverse est beaucoup plus difficile que celle par les extrémités rompues (SIU et REESE, 1953). Il semble donc que l'emploi de la poudre de cellulose WHATMAN réponde à ces conditions et permette de réaliser des expériences reproductibles et comparatives.

Reçu pour publication en juillet 1961.

SUMMARY

CELLULOSE-DECOMPOSING ACTIVITY OF AEROBIC BACTERIA IN SOIL.

Though many papers on the study of cellulose-decomposing fungi (REESE *et al.* ; 1952, 1953, 1956, 1959, 1960 ; WHITAKER *et al*, 1953, 1954 ; MILLER and BLUM, 1956 ; HASH, 1957) have been published, there is little precise information on the cellulose production by aerobic bacteria. The techniques used for the isolation and purification of cellulase-decomposing bacteria from soil differ according to authors and are not always satisfactory (RIVIÈRE, 1951). This may be the reason for knowing so little about the synthesis of cellulase by bacteria, though the cellulose decomposition in soil is a process of great importance.

Under the experimental conditions prevaling, the following conclusions have been reached :

1) Bacterial cellulase is an adaptative exo-enzyme which is synthesised rather slowlly, cellulase never being produced in greater amounts before an incubation of cultures under shaking at 30°C for a fortnight. The pH range under which the synthesis of cellulase occurs is relatively narrow, varying between pH 5,6 and 8 and showing optima at 6.8 with *Cellulomona flavigena C* and at

7 with *Cytophaga aurantiaca A* and *Sporocytophaga myxococcoides B*. Since the two latter strains tend to turn the culture media alkaline, a bufferring of the medium is needed. The greatest amount of cellulase is always found when the molar concentration of the phosphate buffer is M/30-M/75.

Where aeration is good, *Cellulomonas flavigena C* liberates almost five times as much cellulase (23.5 units/ml) as the other two strains.

Cytophaga aurantiaca A and *Sporocytophaga myxococcoides B* always produce the same amounts of cellulase in presence of adequate nitrogen, irrespective of its source, whole *Cellulomonas flavigena* requires peptones and produces the more cellulase the richer the medium is in growth factors (amino acids and B vitamins).

2) While *Cellulomonas flavigena C* produces cellulase in the presence of cellulose or carboxyméthyl-cellulose only, the two other strains are capable of cellulase synthesis in media containing small concentrations of glucose or cellobiose as the only source of carbon. In addition, application of glucose or cellobiose in small concentration (0.05 p. 100) has a marked promoting effect when cellulose is present.

The results conform with the hypothesis propounded by MANDELS and REESE (1960) on the basis of their experiments with cellulose-decomposing fungi. According to these, authors soluble products of enzymatic action (glucose and cellobiose) are the natural promoters of cellulase in insoluble-cellulose media. Small amounts of adaptative enzymes are produced even in absence of cellulose (except for *Cellulomonas flavigena C*); these are hydrolysed, and the soluble products probably enter into the microbial cells and induce the production of large amounts of cellulase. Lower yields of the enzyme by cultures of *Cytophaga aurantiaca A* and *Sporocytophaga myxococcoides* in the sole presence of glucose and cellobiose may be explained by the fact that these glucides exert at high concentrations an inhibing action and prohibit their growth (STANIER, 1942; FAHRAEUS *et al.*, 1947, 1949; SIU, 1951). The mechanism of this complex action is not known.

3) Under cultural conditions which permit a production of large amounts of cellulase, cellulose decomposition, measured by the per-cent loss in cellulose weight, is high and may attain 100 p. 100 with *Cytophaga aurantiaca C* and *Sporocytophaga myxococcoides B*, which was never yet observed (SIU, 1951).

On the other hand, *Cellulomonas flavigena C*, which liberates much more cellulase than the other two bacteria, is incapable of dissolving more than 45 p. 100 of the cellulose.

It can be assumed that bacterial cellulase differs with different strains. The properties of cellulase synthesised by *Cytophaga aurantiaca A* and *Sporocytophaga myxococcoides B* are similar to those of fungal cellulase.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE ZELLULOLYTISCHE TÄTIGKEIT DER AEROBEN BODENBAKTERIEN.

Obgleich die Schriften über das Studium der zellulolytischen Bakterien zahlreich sind, (REESE et al. 1952, 1953, 1956, 1959, 1960; WHITAKER. et 1953, 1954, MILLER et BLUM 1956; HASH, 1957) gibt es trotz allem wenig Genaues über die Erzeugung von Zellulase durch aerobe Bakterien. Die Technik, die es erlaubt, aerobe zellulolytische Bodenbakterien zu isolieren und zu reinigen, sind sehr verschieden je nach Autor und geben nie volle Genugtuung (RIVIÈRE, 1961). Dies mag wohl der Grund sein, dass wir über die bakterielle Zellulase-synthese fast nichts wissen, während die Zellulolyse im Boden eine Erscheinung von grösster Wichtigkeit ist.

So können wir folgendes feststellen :

1° Die bakterielle Zellulase ist ein Exo-Enzym mit langsamer Synthese, und die grösste Menge an Zellulase erscheint nie vor einer 14-täjigen Inkubation in Schüttelkultur bei 30°. Der pH-Bereich dieser Synthese ist relativ eng, zwischen 5,6 und 8,0 optimal bei 6,8 im Falle von *Cellulomonas flavigena C*, 7,0 im Falle von *Cytophaga aurantiaca A* und *Sporocytophaga myxococcoides B*. Beide letzteren Stämme neigen zu einer Alkalisierung ihres Kultursubstrats, so dass eine Pufferung notwendig wird. In jedem Falle findet man die grösste Zellulasenmenge wenn die Mol-Konzentration des Phosphatpuffers zwischen M/30 und M/75 liegt.

Bei genügender Lüftung gibt *Cellulomonas flavigena C* fast fünf mal mehr Zellulase al als die zwei andern Stämme (23,5 Einheiten pro ml).

Cytophaga aurantiaca A und *Sporocytophaga myxococcoides B* erzeugen immer die gleiche Menge, sofern genügend Stickstoff vorhanden, gleich aus welcher Quelle, während *Cellulomonas flavigena C* Peptone benötigt und desto mehr Zellulase entwickelt, als das Substrat Wuchsstoffe enthält (Aminsäuren und Vitamine der B-Gruppe.)

2° Während *Cellulomonas flavigena C* Zellulase nur im Beisein von Zellulose oder Karbo-methyl-Zellulose erzeugt, vermögen die zwei andern untersuchten Stämme in einem Milieu, in dem die einzige Kohlenstoffquelle durch Glukose oder Zellbiose in schwacher Konzentration zugeführt wird, genügende Mengen zu synthetisieren. Ausserdem erzeugt in, Gegenwart von Zellulose, das Heranführen

von Glukose oder Zellbiose in schwacher Konzentration — 0,5 p. 100) einen markierten Indukteffekt.

Diese Ergebnisse stimmen mit der Annahme von MANDELS und RÉESE (1960), die auf Experimentierung mit Zellulytischen Bakterien beruht, überein. Nach diesen Autoren, in Anbetracht dass Zellulose ein unlösliches Substrat ist, sind es die löslichen Produkte der enzymatischen Wirkung (Glukose, Zellbiose) die als natürliche Induktoren der Zellulase wirken. Kleinere Mengen adaptiver Enzyme werden selbst bei Fehlln von Zellulose erzeugt. (ausgenommen im Falle *Cellulomonas flavigena C*) Ist diese vorhanden, so wird sie hydrolysiert, die lösbaren Stoffe dringen wahrscheinlich ins Innere der Mikrobenzellen und lösen die Erzeugung einer grossen Menge Zellulase aus. Die geringeren Enzymerträge, die in *Cytophaga aurantiaca A* und *Sporocytophaga myxococcoides B*. Kulturen in Gegenwart von Glukose und Zellbiose beobachtet werden, erklären sich dadurch, dass diese Gluzide eine Hemmwirkung ausüben, die das Wachstum blockieren, sobald die Konzentration zunimmt. (STANIER, 1942 ; FAHRAEUS et al. 1947, 1949, SIU 1951).

Der Mechanismus dieser komplizierten Wirkung ist unbekannt.

3° Werden die Kulturbedingungen, die die grösstmögliche Zellulase erzeugen, erfüllt, so ist die durch den Verlustanteil an Zellulose gemessene Zellulolyse sehr hoch und erreicht 100 p. 100 im Falle von *Cytophaga aurantiaca A* und *Sporocytophaga mycococcoides B*, was noch nie beobachtet wurde (SIU, 1951).

Hingegen vermag *Cellulomonas flavigena C*, obwohle sie viel mehr Zellulase als die beiden andern Bakterien freigibt, nicht mehr als 45 p. 100 Zellulose zu lösen.

Es ist anzunehmen, dass die bakteriellen Zellulasen je nach Stamm verschieden sind. Die Eigenschaften der durch *Cytophaga aurantiaca A* und *Sporocytophaga myxococcoides B* synthetisierten Zellulasen stellen sie neben die pilzlichen Zellulasen.

Целлюлоразлагающая деятельность аэробных бактерий почвы.

Ж. РИВЬЕР.

Если и существует много публикаций по вопросу изучения целлюлоразлагающих грибков (Реезе 1952, 1953, 1956, 1959, 1960; Виттакер 1953, 1954; Миллер и Блюм 1956; Хаш 1957) то точные данные о производстве целлюлазы аэробными бактериями очень редки. Способы изоляции очищенных целлюлоразлагающих аэробных бактерий из данной почвы различны в зависимости от авторов и не всегда удовлетворительны (Ривьер 1961). Это по всей вероятности и об'ясняет тот факт, что нам почти ничего известно о синтезе целлюлазы этими бактериями, несмотря на то что гидролиз клетчатки в почве является феноменом большой важности.

В этих условиях можно утверждать что :

1° Целлюлаза бактерий представляет из себя адаптационный экзоэнзим являющийся результатом длительного синтеза ибо большее количество произведенной целлюлазы никогда не появляется раньше пятнадцати дней инкубации во взбалтывающихся культурах при 30 °Ц. Зона кислотности допускающая синтез целлюлазы относительно не широка и заключается между pH 5,6 и pH 8,0; pH 6,8 является оптимальным для *Cellulomonas flavigena C*, pH-7-для *Cytophaga aurantiaca A* или для *Sporocytophaga myxococcoïdes B*. В виду тенденции этих двух последних видов ощелочать среду культуры, необходимо эту среду буферовать. Во всех случаях при молярной концентрации фосфатного буфера от M/30 до M/75 получается наибольшое количество целлюлазы.

При усиленной аэрации *Cellulomonas flavigena C* освобождает почти в пять раз более целлюлазы чем два других вида (23,5 единиц на мл)

В присутствии достаточного количества азота и вне зависимости от источника этого азота *Cytophaga aurantiaca A* и *Sporocytophaga myxococcoïdes B* производят одинаковые количества целлюлазы, тогда-как *Cellulomonas flavigena C* требует присутствия в среде пептонов и производит тем больше целлюлазы, цем более среда содержит действующих начал произростания (аминокислоты, витамины группы B);

2° В противовес виду *Cellulomonas flavigena C* вырабатывающему целлюлазу только в присутствии клетчатки или-же карбоксил-метил-целлюлозы, два другие изученные вида могут ее синтетизировать особенно в среде где единственным источником углерода являются глюкоза или целлобиоз в слабой концентрации. Кроме того прибавление глюкозы или целлобиоза в слабой концентрации вызывает явный активирующий эффект в присутствии клетчатки.

Эти результаты согласуются с гипотезой Мандельса и Реезе (1960) основанной на опытах над целлюлоразлагающими грибками.

По этим авторам, в виду того что клетчатка представляет из себя нерастворимый субстрат, натуральными индукторами для целлюлазы являются растворимые вещества ферментационного процесса. Даже в отсутствии клетчатки, бактерии (за исключением *Cellulomonas flavigena C*) производят небольшие количества адаптационных ферментов. Когда-же клетчатка есть, она подвергается гидролизу, растворимые вещества проникают по всей вероятности вглубь клеточек микроба и вызывают активное производство крупных количеств целлюлазы. Бобее слабые количества энзимов полученные в культурах *Cytophaga aurantiaca A* и *Sporocytophaga myxococcoïdes B* в присутствии только глюкозы и целлобиоза об'ясняются тем что эти углеводы при увеличении их концентрации производят ингибиционный эффект на произростание (Стание 1942; Фареус 1947, 1949; Сиу 1951). Механизм этого сложного действия-неизвестен.

3° В случаях реализации условий культуры необходимых для производства наибольшего количества целлюлазы, клеточный гидролиз измеряемый процентом потери веса клетчатки очень велик и достигает до 100 % у *Cytophaga aurantiaca A* и *Sporocytophaga myxococcoïdes B*, что еще никогда не наблюдалось (Сиу 1951).

Напротив, несмотря на то что *Cellulomonas flavigena C* освобождает гораздо больше целлюлазы чем два другие вида, она не может растворить более 45 % целлюлазы.

Можно думать что бактерийные целлюлазы различны в зависимости от вида. Свойства целлюлазы синтетизированной видами *Cytophaga aurantiaca A* и *Sporocytophaga myxococcoïdes B* приближают ее к целлюлазам грибковым.

REMERCIEMENTS

Nous remercions la Société d'Études et d'Applications biochimiques, Jouy-en-Josas, pour le concours qu'elle nous a apporté dans la réalisation de ce travail.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLUM R. and STAHL W. H., 1952. Enzymic degradation of cellulose fibers. *Text. Res. J.*, **22**, 178.

BREED R. S., MURRAY E. G. D. and SMITH N. R., 1957. *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*, 7ème édition, Williams et Wilkins C°, Baltimore.

COHN M., 1956. On the inhibition of glucose of the induced synthesis of β-galactosidase in *E. coli*. *Enzymes, units of biological structure and function*, p. 41, Academic Press, New-York.

FAHRAEUS G., 1947. Studies in the cellulose decomposition by *Cytophaga*. *Symb. Bot. Upsaliensis*, **2**, 56.

FOLIN O. and CIOCALTEN V., 1927. Tyrosine and determination in proteins. *J. Biol. Chem.*, **73**, 627.

FULLER W. H., 1942. The isolation of aerobic cellulose-decomposing organisms and their action on cellulose and associated plant constituents. Thesis. Departement of Agronomy, Iowa State College.

GILLIGAN W. and REESE E. T., 1954. Evidence for multiple components in microbial cellulases. *Canad J. Microbiol.*, **1**, 90.

HALLIWELL G., 1959. The enzymic decomposition of cellulose. *Nutr. Abstr. Revs.*, **29**, 747.

HAMMERSTROM R. A., CLAUS H. D., COGHLAN J. W., and Mc BEE R. H., 1955. The constitutive nature of bacterial cellulase *Arch. Biochem. Biophys.*, **56**, 123.
HASH J. H., 1957. Cellulolytic enzyme systems of *Myrothecium verrucaria*. Thesis, Va. Poly. Inst., Blacksburg, Va.
HULCHER F. H. and KING K. W., 1958. Disaccharide preference of an aerobic cellulolytic bacterium, *Cellvibrio gilvus* N. S. P. *J. Bacteriol.*, **76**, 565.
JEUNIAUX C., 1958. Researches on chitinases. *Arch. Intern. Physiol. Biochem.* **66**, 408.
KING K. W., 1956 Basic properties of the dextrinizing cellulases from the rumen of cattle. *Va. Agr. Expt. Sta. Techn. Bull.*, 127.
KOOIMAN P., ROELOFSEN P. A. and SWEERIS S., 1953. Some properties of cellulase from *Myrothecium verrucaria. Enzymologia*, **16**, 237.
KUNITZ, 1960. *Cristallin Enzym*, 309. Columbia University Press.
LEVINSON H. S. and REESE E. T., 1950. Enzymatic hydrolysis of soluble cellulose derivatives as measured by changes in viscosity. *J. Gen. Physiol.*, **33**, 601.
MANDELS M. and REESE E. T., 1960. Induction of cellulase in Fungi by cellobiose. *J. Bacteriol.* **79**, 816.
MILLER G. L. and BLUM R., 1956. Resolution of fungal cellulase by zone electrophoresis. *J. Biol. Chem.*, **218**, 131.
NEIDHARDT F. and MAGASANIK B., 1957. Effect of mixtures of substrates on the biosynthesis of inducible enzymes in *Aerobacter aerogenes. J. Bacteriol*, **73**, 260.
POCHON J. et BARJAC H. de, 1958. *Traité de microbiologie des sols*. 192-236 Dunod éd., Paris.
REESE E. T., 1946. Thesis. Pennsylvania State College.
REESE E. T., SIU R. G. H. and LEVINSON H. B,. 1950. Biological degradation of soluble cellulose derivatives. *J. Bacteriol.*, **59**, 485.
REESE E. T. 1947. On the effect of aeration and nutrition on cellulose decomposition by certain bacteria. *J. Bactrieol.*, **53**, 389.
REESE E. T. and LEVINSON H. S., 1952. A comparative study of the breakdown of cellulose by microorganisms. *Physiol. Plantarum*, **5**, 345.
REESE E. T., 1956. A microbiological process report : enzymatic hydrolysis of cellulose. *Appl. Microbiol.*, **4**, 39.
REESE E. T., 1959. *Cellulose decomposition : Fungi Marine Boring and Fouling Organisms. Friday Harbor Symposia*, University of Washinton Press, Seattle.
RIVIERE J., 1961. Activité cellulolytique des Bactéries aérobies du sol. I. Isolement et purification. Ces Annales.
SIJPESTEIJN A. K. and FAHRAEUS G., 1949. Adaptation of *Sporocytophaga myxococcoides* to sugars. *J. Gen. Microbiol.*, **3**, 224.
SIU R. G. H., 1951. *Microbial decomposition of cellulose*. Reinhold Publ. Co., N. Y.
SIU R. G. H. and REESE E. T., 1953. Decomposition of cellulose by microorganisms. *Bot. Revs.*, **19**, 377.
STANIER C. Y., 1942, The *Cytophaga* group. *Bact. Revs.*, **6**, 143.
STORVICK W. O. and KING K. W., 1960. Complexity and mode of action of the cellulase system of *Cellvibrio gilvus*. *J. Biol. Chem.*, **225**, 303.
SUMNER J. B. and SOMERS G. F., 1944. *Laboratory experiments in biological chemistry*. Academic. Press., Inc., New-York.
WHITAKER D. R., 1953. Purification of *Myrothecium verrucaria* cellulase. *Arch. Biochem. Biophys.*, **43**, 253.
WHITAKER D. R., CALVIN J. R. and COOK W. H., 1954. Molecular weight and shape of *Myrothecium verrucaria* cellulase. *Arch. Bioch. Biophys.*, **49**, 257.

Ann. agron., 1961, **12** (4), 425-433.

631. 473 (44)

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE DE TERRES CALCAIRES

G. BARBIER et Mme HAAS ÁRPÁDNÉ (1).
Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles.

SOMMAIRE

Etude de laboratoire sur l'état et le comportement de l'acide phosphorique de terres argilo-calcaires avant et après destruction du calcaire.

Il est établi que le calcaire en poudre a la propriété d'adsorber les ions phosphoriques [2, 3] : une solution phosphatée dans laquelle le produit des activités des ions PO_4''', Ca^{++} et OH^- reste très inférieur au seuil de précipitation d'un phosphate calcique, mélangée à une poudre de calcaire, cède à celle-ci une partie de ses ions PO_4''', jusqu'à un équilibre.

Voici d'après BOISCHOT et al. l'ordre de grandeur des quantités de PO_4''' qu'un carbonate de calcium pur précipité est susceptible d'adsorber, à pH environ 8,5 :

Concentration à l'équilibre, en mg P_2O_5 par litre	0,07	0,21	0,84
P_2O_5 adsorbé par million de calcaire	41	75	111

Ces quantités apparaissent assez petites, comparées à celles adsorbables par les argiles des sols, soit par exemple 5 ou 10 fois plus petites environ. Ainsi dans des terres argilo-calcaires contenant des proportions voisines d'argile et de calcaire fin, le rôle de ce dernier pourrait être tenu pour assez effacé, dans l'hypothèse d'une simple additivité des pouvoirs adsorbants des deux constituants.

Les expériences décrites ci-dessous ont eu pour but de rechercher dans quelle mesure la destruction du calcaire altère le pouvoir adsorbant de terres argilo-calcaires à l'égard de PO_4'''. Elles ont consisté à comparer l'adsorption de PO_4''' avant et après destruction du calcaire par un traitement chlorhydrique de très courte durée suivi immédiatement de recalcification.

(1) Travail effectué au cours d'un stage d'un mois de Mme HAAS ÁRPÁDNÉ, agrégée de cours à l'Université des Sciences agraires de GÖDÖLLÖ (Hongrie).
(2) BOISCHOT, P., COPPENET, M. et HEBERT, J. — *Ann. Agron.* 1949, 103-112.
(3) COLE, C. V., OLSEN, S. R. et SCOTT, C. O. — *Soil. Sci. Soc. Amer. Proc.*, 17 (1953), 352-356.

TECHNIQUE

Les terres ont été délayées dans l'eau distillée, par portions de 20 à 50 gr. On a ensuite siphonné les particules restant en suspension après sédimentation de 1 minute sous 3,5 cm (taille un peu supérieure au « limon »). La suspension obtenue a été divisée en deux parties égales. A l'une d'elles, on a ajouté, d'un seul coup, de l'acide chlorhydrique 6 N en léger excès sur le CO_3Ca présent (excès d'environ 20 cc d'acide 6 N pour 1 litre). En raison de sa finesse, le calcaire se dissout très rapidement. On ajoute immédiatement ensuite de l'eau de chaux saturée en quantité correspondant approximativement à l'excès d'acide ; puis on ajuste le pH au même niveau que celui de la suspension non décalcarifiée.

On élimine ensuite les sels dissous des deux suspensions par centrifugations et remises en suspension dans l'eau. On ajuste encore une fois le pH de la suspension décalcarifiée.

On peut objecter à ce mode opératoire que le traitement chlorhydrique altère — en général augmente — le pouvoir adsorbant des colloïdes argileux pour PO_4''' (après recalcification). C'est pour cette raison que nous avons utilisé des suspensions fines, dont le calcaire peut être dissous en quelques dizaines de secondes par un acide dilué. D'après l'expérience de l'un de nous (1), ce n'est qu'après un contact prolongé avec l'acide que l'on observe une augmentation du pouvoir adsorbant de l'argile.

Plusieurs portions égales des suspensions calcaires et décalcarifiées, contenant 1 à 2 gr de matière sèche exempte de calcaire, ont été amenées à un volume de 40 cc. On a ajouté $CaCl_2$ pour obtenir finalement une concentration 0,01 N, puis, lentement et en agitant, 50 cc d'une solution phosphatée diluée (phosphate calcique à 0, 2, 4 ou 8 mg P_2O_5 par litre). Après 24 heures de contact, dont 2 heures d'agitation, on a filtré et dosé P_2O_5 en solution (réaction sulfomolybdique ; réduction par l'acide ascorbique). La composition des suspensions et les résultats des essais sont indiqués dans les tableaux ou sur les figures ci-dessous.

Technique de dilution isotopique.

Nous avons utilisé cette technique pour déterminer dans quelle mesure le traitement chlorhydrique suivi de recalcification et de lavages à l'eau peut modifier la quantité de PO_4''' diffusible (« isotopiquement diluable ») du sol. Voici le mode opératoire adopté (2) :

Un volume de suspension contenant un poids connu de terre (15 à 20 g) a été amené à 200 cc avec de l'eau ; on y a ajouté lentement en agitant 10 cc d'une solution $^{32}PO_4$ contenant 10^7 à 10^8 désintégrations/minute (1 millicurie = $2{,}22 \times 10^9$ désintégrations/minute) et une trace d'entraîneur (1 mg P_2O_5 par litre). Après 24 heures de contact, dont 6 heures d'agitation mécanique, on a ajouté 3 gr de charbon décolorant (soigneusement purifié par HCl) puis 7 g de bicarbonate de sodium très pur (concentration 0,4 M environ). On a agité 5 minutes, puis filtré immédiatement sur Büchner. Cette addition de bicarbonate de sodium a uniquement pour but d'extraire une fraction plus importante du mélange isotopique des PO_4''' formé en milieux aqueux, de manière à faciliter le dosage chimique de PO_4''' en solution ; nous admettons, après quelques contrôles, que ce traitement ne modifie pas la composition isotopique.

Dans le liquide filtré, on dose PO_4''' par colorimétrie et l'on compte la radioactivité. La méthode de comptage la plus précise consiste à précipiter $^{32}PO_4'''$ en présence d'une quantité constante d'entraîneur (10 mg P_2O_5), à l'état de phosphomolybdate par exemple, et à compter au compteur-cloche la radioactivité du précipité recueilli sur une rondelle de papier filtre. Nous avons utilisé un compteur à liquide, ce qui est plus rapide, malgré la nécessité de rincer soigneusement le compteur avec HCl 0,1 N et de l'eau, et de recompter le mouvement propre, entre chaque mesure. Compter 2 ou 3 fois 3 minutes et prendre la moyenne. Retrancher le mouvement propre.

Étalonner le compteur avec la solution radioactive ajoutée aux suspensions, après dilution convenable et addition d'une forte dose d'entraîneur.

Formule de dilution isotopique.

La formule la plus générale est :

$$\frac{R}{M} = \frac{r}{m}$$

(1) BARBIER, G. et CHABANNES, J. — *Ann. Agron.*, 1949, 364.
(2) Méthode mise au point par TENDILLE C. (non publiée).

R = radioactivité totale introduite.

M = masse totale de l'élément isotopiquement diluée (y compris, en l'espèce, PO_4''' éventuellement introduit en solution, ou comme impuretés dans les réactifs ajoutés à la suspension de sol — on retranche alors ce PO_4''' de M).

r et m = radioactivité et masse de l'élément dans un même volume quelconque de solution.

Si l'on compte au compteur-cloche des précipités obtenus à partir de fractions aliquotes de solution standard et de solution de l'essai, il n'y a pas de difficulté.

Dans le cas du compteur à liquide, le calcul est un peu plus subtil.

1re façon de raisonner. On a introduit dans chaque essai un certain volume de solution radioactive, qui amené à un volume V_0 (pour le comptage-étalon) donne N_0 coups/minute. Soit y le volume utile du compteur.

On peut considérer que la radioactivité totale introduite (R) est :

$$\frac{N_0 \times V_0}{y}$$

La solution séparée de la suspension de terre donne N coups/minute (Si on l'a diluée, on multiplie le nombre trouvé par le facteur de dilution pour obtenir N.).

Donc le volume y de cette solution contient N coups/minute. Si la concentration en P_2O_5 est c, le volume y contient cy P_2O_5. Donc :

$$\frac{r}{m} = \frac{N}{cy}$$

D'où :

$$M = \frac{cy}{N} \times \frac{N_0V_0}{y} = \frac{N_0V_0c}{N}$$

c en γ P_2O_5 par cc par exemple.
V_0 en cc.
M en γ P_2O_5 dans l'essai.

2me mode de raisonnement.

Les fractions en solution de P^{32} et de P^{31} isotopiquement dilués sont égales entre elles, par définition. Si l'on désigne par V le volume de la solution :

$$\frac{N_0V_0}{NV} = \frac{M}{cV}$$

D'où

$$M = \frac{N_0V_0c}{N}$$

RÉSULTATS ET DISCUSSION

On a utilisé cinq terres :

— Terre de Saint-Yvoine (région de Clermont-Ferrand), sur calcaire lacustre.

— Terre de Bordeaux, sur alluvions calcaires fines.

— 2 terres de la ferme du Rafidin (Champagne), sur craie tendre, en provenance d'un champ d'expériences, l'une sans engrais phosphatés, l'autre ayant reçu du superphosphate pendant 4 ans (680 kg P_2O_5 par ha, au total).

— Terre de Grasse : terre rouge sur calcaire dur (1).

(1) Nous devons ces terres à l'obligeance de nos collègues directeurs de stations agronomiques, que nous remercions vivement.

Le 1er Tableau indique la composition des suspensions obtenues à partir de ces terres :

Composition des suspensions de terre.

Origine	Traitement	Grammes par litre			pH initial	P_2O_5 isotopiquement diluable (1)	Volume de suspension par essai
		extrait sec	CO_3Ca	argile 2µ			
St-Yvoine	décalcarifiée	42,7	0	25,4	8,43	»	40 cc
	calcaire	58,9	16,2		8,45	»	40 cc
Bordeaux	décalcarifiée	38,2	0	21,5	8,07	453	30 cc
	calcaire	73,2	35		7,95	214	30 cc
Rafidin témoin	décalcarifiée	33,8	0	14,4	8,3	416	35 cc
	calcaire	113,8	80		8,15	52,5	35 cc
Rafidin super-phosphate	décalcarifiée	29,5	0	12,6	8,32	405	40 cc
	calcaire	92,5	61		8,0	107,5	40 cc
Grasse	décalcarifiée	121,6	0	29,9	8,0	700	10 cc
	calcaire	133,1	11,2		8,1	300	10 cc

(1) P_2O_5 isotopiquement dilué après 24 heures de contact, par million de terre sèche initiale (non décalcarifiée).

Terre de St-Yvoine.

Par million de terre exempte de calcaire	Décalcarifiée			Calcaire		
P_2O_5 ajouté	58,5	117	234	58,5	117	234
P_2O_5 resté en solution	124	154	205	10,5	18,9	40,5
P_2O_5 adsorbé	— 65,5	— 37	29	48	98,1	193,5
mg P_2O_5 par litre de solution	2,3	2,85	3,8	0,195	0,35	0,75

Terre de Bordeaux.

Par million de terre exempte de calcaire :	Décalcarifiée				Calcaire			
P_2O_5 ajouté	0	87	175	349	0	87	175	349
P_2O_5 resté en solution	141	188	218	306	31	62,5	93	174
P_2O_5 adsorbé	- 141	- 101	- 43	43	- 31	24,5	82	175
mg P_2O_5 par litre de solution	1,76	2,34	2,73	3,81	0,39	0,78	1,165	2,175

Terre du Rafidin témoin.

Par million de terre exempte de calcaire :	Décalcarifiée				Calcaire			
P_2O_5 ajouté	0	85	170	339	0	85	170	339
P_2O_5 resté en solution	79,5	93	118	148	3,1	14	8	20,2
P_2O_5 adsorbé	- 79,5	- 8	52	191	- 3,1	71	162	319
mg P_2O_5 par litre de solution	1,02	1,2	1,52	1,9	0,04	0,14	0,1	0,26
pH final	7,8	7,8	7,75	7,75	7,6	7,42	7,5	7,5

Terre du Rafidin-superphosphate

Par million de terre exempte de calcaire :	Décalcarifiée				Calcaire			
P_2O_5 ajouté	0	84,5	169	338	0	84,5	169	338
P_2O_5 resté en solution	78	83	98	123	10,3	13,3	20,7	38,5
P_2O_5 adsorbé	—78	1,5	71	215	— 10	71	148	300
mg P_2O_5 par litre de solution	1,0	1,12	1,25	1,58	0,13	0,17	0,27	0,50
pH final	7,65	7,7	7,67	7,68	7,5	7,53	7,5	7,5

Terre de Grasse

Par million de terre exempte de calcaire :	Décalcarifiée				Calcaire			
P_2O_5 ajouté	0	82,5	165	329	0	82,5	165	329
P_2O_5 resté en solution	152	180	217	282	26	44,5	73	85
P_2O_5 adsorbé	—152	—97,5	—52	47	—26	38	92	244
mg P_2O_5 par litre de solution	2,01	2,39	2,86	3,72	0,34	0,52	0,97	1,12
pH final	7,45	7,57	7,5	7,5	7,45	7,5	7,55	7,48

D'après les diagrammes, les terres calcaires et décalcarifiées se comportent très différemment, pour chacun des cinq sols étudiés : les terres calcaires adsorbent beaucoup plus de PO_4 que les terres décalcarifiées, et en cèdent beaucoup moins à une solution pauvre en PO_4. La différence est très marquée même pour des suspensions relativement peu calcaires : celles des terres de Saint-Yvoine et surtout de Grasse. A noter que le calcaire de la suspension de cette dernière terre est relativement lentement attaquable. Les concentrations d'équilibre (intersection avec l'axe des x) sont respectivement pour ces deux terres :

mg P_2O_5 par litre :

	Décalcarifiée	Calcaire
Saint-Yvoine	3,2	0,1
Grasse	3,3	0,45

Le « potentiel PO_4''' » (l'énergie libre des ions PO_4''') est particulièrement bas dans la terre de Saint-Yvoine calcaire, et très élevé dans la même terre décalcarifiée.

L'abaissement des diagrammes figurant l'adsorption de PO_4''' ajouté peut s'expliquer de deux façons :

1° Les diagrammes des terres calcaires et décalcarifiées auraient approximativement la même origine, c'est-à-dire que les deux suspensions contiendraient approximativement la même quantité de PO_4''' diffusible ; mais la destruction du calcaire diminuerait fortement le pouvoir adsorbant du sol ; en conséquence à une même quantité adsorbée présente dans le sol correspondrait dans la solution une concentration beaucoup plus élevée après destruction du calcaire.

2° La décalcarification n'altérerait pas sensiblement le pouvoir adsorbant, mais libérerait une quantité importante de PO_4''' ne participant pas jusqu'alors aux équilibres de distribution entre solide et solution. L'origine du diagramme serait beaucoup plus basse pour la terre décalcarifiée que pour la terre calcaire. Une translation convenable de l'origine des ordonnées amènerait les deux diagrammes à coïncider ou à se raccorder approximativement.

D'après la première hypothèse, la différence des ordonnées des deux diagrammes pour une même abscisse correspondrait au pouvoir adsorbant du calcaire. Or cette différence atteint pour toutes les terres examinées au moins 300 P_2O_5 par million de terre (exempte de calcaire). Il est improbable que le calcaire, de la terre de Grasse notamment, puisse adsorber une telle quantité, qui atteindrait au moins, pour cette terre, d'après le graphique et le premier tableau :

$$\frac{300 \times 121{,}6}{11{,}2} = 3.300 \ P_2O_5 \text{ par million de calcaire,}$$

pour une concentration d'environ 1 mg P_2O_5 par litre.

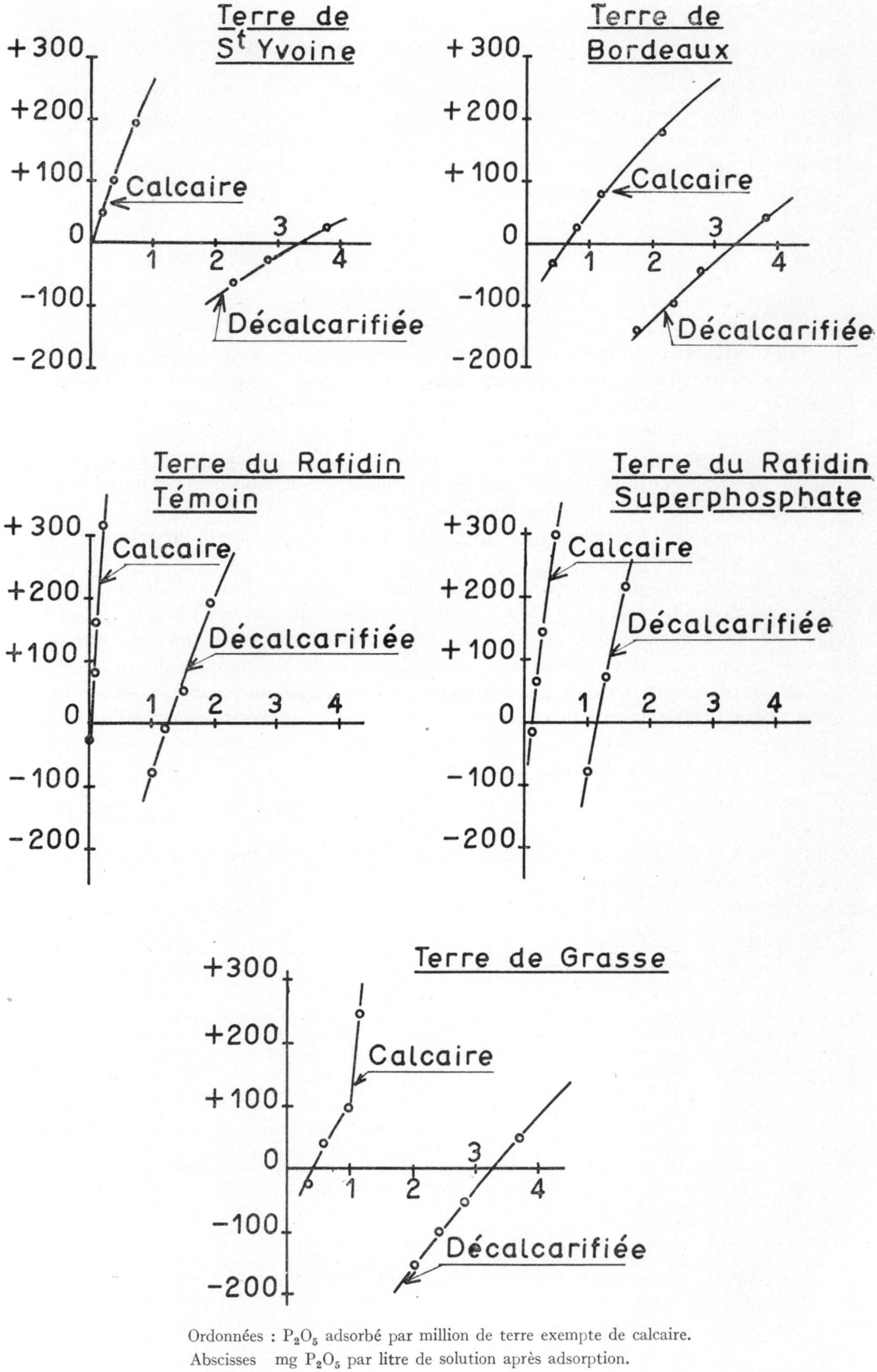
Ce chiffre est tout à fait invraisemblable d'après les résultats précités de BOISCHOT et al., même en supposant que ce calcaire ait une surface spécifique particulièrement grande.

La deuxième hypothèse est en accord avec les mesures de PO_4''' isotopiquement diluable des suspensions calcaires et décalcarifiées (voir premier tableau). L'augmentation de PO_4 isotopiquement diluable après décalcarification et recalcification est au moins égale à la différence des ordonnées des deux diagrammes :

P_2O_5 par million de terre exempte de calcaire.

	Différence approximative des ordonnées des 2 diagrammes pour une concentration de 1 mg P_2O_5 par litre	Différence des quantités de PO_4 isotopiquement diluable
Bordeaux	280	460
Rafidin témoin	> 600	1.200
Rafidin superphosphate	> 500	930
Grasse	environ 400	440

D'après ces données l'augmentation de PO_4 isotopiquement diluable suffit pour rendre compte du décalage des diagrammes.



Ordonnées : P_2O_5 adsorbé par million de terre exempte de calcaire.

Abscisses mg P_2O_5 par litre de solution après adsorption.

Quant aux causes possibles de cette augmentation, on peut songer bien entendu à une dissolution de phosphates cristallisés par le traitement chlorhydrique. Mais aussi d'après un travail précité (BARBIER et CHABANNES) la recalcification d'une terre préalablement lessivée par un acide dilué, libère des ions phosphoriques, même si la réaction du sol est incompatible avec la présence de phosphates calciques.

RÉSUMÉ ET CONCLUSION

La destruction du calcaire de différentes terres argilo-calcaires par traitement à l'acide chlorhydrique dilué pendant un temps très court (quelques dizaines de secondes) suivi immédiatement de recalcification, a profondément modifié le comportement de l'acide phosphorique : les diagrammes de PO_4''' adsorbé sont fortement abaissés après ce traitement. Ce fait peut être dû à deux causes :

1° destruction du pouvoir adsorbant du calcaire, sans modification importante de la quantité de PO_4''' distribuable entre sol et solution.

2° libération d'une quantité importante de PO_4''' qui, avant destruction du calcaire, ne participait pas aux équilibres.

Cette deuxième cause apparaît prépondérante : la destruction du calcaire a augmenté beaucoup la quantité de PO_4''' isotopiquement diluable en 24 heures, jusqu'à 400 P_2O_5 par million de terre (partie fine) même dans une terre peu calcaire (terre de Grasse, ayant reçu antérieurement, il est vrai, d'abondantes fumures phosphatées).

Il resterait à étudier sous quelle forme se trouve dans le sol l'acide phosphorique ainsi libéré : phosphates calciques cristallisés, ou PO_4''' réversiblement adsorbé à l'intérieur des grains calcaires, et de ce fait très lentement diffusible (ne subissant que très lentement la dilution isotopique).

Reçu pour publication en septembre 1961

SUMMARY

A CONTRIBUTION TO THE STUDY OF PHOSPHORUS IN CALCAREOUS SOILS.

Destruction of limestone in different calcareous clay soils, by treatment with diluted hydrochloric acid for very short periods (20-30 seconds) immediately followed by recalcification, greatly altered the behaviour of phosphorus in the soil ; the treatment markedly decreased the curves of PO_4 adsorption, possibly due to the following two factors :

1) Destruction of the adsorbingp ower of the limestone, without any noticeable modification in the amounts of PO_4 distributed betwen the soil and solution ;

2) liberation of a large amount of PO_4 which did not participate in the equilibria before the destruction of the limestone.

The second factor appeard to predominate : the destruction of limestone greatly increased the amount of PO_4 isotopically dilutable within 24 hours, up to 400 p. p. m. P_2O_5 in the fine fraction even of a slightly calcareous soil (soil from Grasse which, however, received previously heavy dressings of phosphate fertilizers).

It remains to be seen in what form the thus liberated PO_4 occurs in the soil : crystalline calcium phosphate, or PO_4 adsorbed inside of the limestone particles and thus undergoing very slow diffusion and consequently a very slow isotopic dilution.

ZUSAMMEN FASSUNG

BEITRAG ZUM STUDIUM DER PHOSPHORSUÄRE IN KALKBÖDEN.

Die Zerstörung des Kalkes in verschiedenen KalkTonböden durch verdünnte Salzsäure während sehr kurzer Zeit, (einige Zehntel Sekunden) mit sofortiger Wiederkalzifizierung, hat das Verhalten der Phosphorsäure tiefgehend verändert : die Diagramme vom adsorbierten PO_4''' sind nach der Behandlung stark gefallen. Dies dürfte zweierlei Gründe haben :

1° Zerstörung des Kalk-Adsorbtionsvermögens, ohne wesentliche Änderung der zwischen Boden und Lösung verteilbaren PO_4''' -Menge.

2° Freilassung einer wichtigen Menge PO4''', die vor Zerstörung des Kalkes nicht am Gleichgewicht teilnahm.

Diese zweite Ursache scheint vorherrschend zu sein : die Zerstörung de Kalkes hat die isotopisch verdünabare PO_4''' -Menge erhöht, und zwar bis zu 400 P_2O_5 pro Million Boden (Feinteile) selbst in einem wenig kalkhaltigen Boden (Boden aus Grasse, der jedoch vorher eine grössere Phos phatdüngung erhielt).

Es bleibt noch zu untersuchen, unter welcher Form sich diese so freigewordene Phosphorsäure im Boden befindet : kristallisierte Kalkphosphate oder reversibel im Innern der Kalkkörner adsorbiertem PO_4''', und deshalb sehr langsam diffundierend.

Добавление к вопросу изучения фосфорной кислоты в известковых почвах.

Г. БАРБИЕ и ХААС АРПАДНЭ (Версаль).

Разрушение извести различных глинисто-известковых почв обработкой их в течении очень короткого времени (несколько десятков секунд) разбавленной соляной кислотой, с последующей немедленной рекальцификацией, в корне изменяет поведение фосфорной кислоты : после этой обработки диаграммы указывают на сильное понижение количества поглощенного PO_4'''.

Факт этот может быть вызван двумя причинами :

1. Уничтожением поглотительной способности извести без чувствительных изменений количеств PO_4''' распределенного между почвой и раствором.

2. Освобождением больших количеств PO_4''' не принимавших участия в обмене до разрушения извести.

Предполагается что эта последняя причина и является главной : разрушение извести увеличивает количество изотопическии растворимого за 24 часа PO_4''' до 400 P_2O_5 на миллион почвы (мелкая часть), даже в почвах мало-известковых (почвы Грасса, получившие правда до этого крупные количества фосфорных удобрений).

Остается исследовать какие формы примет в почве освобожденная таким образом фосфорная кислота : кристаллических известковых фосфатов или непрочного, но трудно диффузируемого PO_4''' поглощенного внутрь известиовых зерен (подвергающегося медленному изотопическому растворению).

Ann. agron., 1961, **12**, (4), 435-447.

634. 11 : 631. 8 (44)

LA FERTILISATION DU POMMIER DANS LES SOLS ARGILO-CALCAIRES DE L'AUVERGNE. EXPÉRIENCES A LA PLANTATION ET APRÈS PLANTATION

L. GACHON ET D. COLLIER
Station d'Agronomie,
Centre de Recherches agronomiques du Massif Central, Clermont-Ferrand.

SOMMAIRE

Les auteurs donnent les résultats de 3 essais de fertilisation du Pommier, variétés *Reinette blanche du Canada* et *Reinette du Mans* greffés sur M II en verger travaillé.

L'un des essais étudie l'efficacité des éléments N, P et K appliqués à la plantation. La vigueur et la production des arbres sont contrôlés pendant 7 ans.

Les deux autres essais concernent des vergers de 1 et 2 ans qui ont reçu chaque année pendant 9 et 11 ans des engrais appliqués seulement en couverture.

Dans les sols argileux et profonds de la Limagne, chimiquement bien pourvus en éléments fertilisants, les jeunes pommiers n'ont pas réagi aux différentes fumures expérimentées.

INTRODUCTION

Le Pommier est l'espèce fruitière la plus cultivée de l'Auvergne où la trace de son existence est connue depuis les temps préhistoriques. La variété *Reinette blanche du Canada* représente environ les trois quarts de la production régionale de pommes de table.

La culture traditionnelle est pratiquée surtout dans le Puy-de-Dôme, où elle est concentrée dans les vallées des affluents de la rive gauche de l'Allier. Elle occupe plus de 2 000 hectares de prés-vergers plantés d'arbres hautes tiges greffés soit sur Franc, soit sur le porte-greffe local *Noir de Monton*. Les vergers sont situés dans le périmètre irrigué par des biefs de dérivation latérale ; en effet, il s'est avéré par expérience que la *Reinette du Canada*, espèce délicate, ne pouvait normalement prospérer en pré-verger si elle ne bénéficiait pas d'irrigations régulières. L'un de nous a étudié le comportement de cette variété dans une gamme de conditions pédoclimatiques très variées.

Le besoin impératif d'irrigations a donc limité l'aire de culture traditionnelle du pommier *Canada* dont le mode habituel d'exploitation conduit au remplacement

progressif des arbres déficients. En conséquence tous les prés-vergers présentent des arbres de tous âges pouvant atteindre 150 ans. Cette situation particulière, outre les difficultés d'expérimentation inhérente à toute espèce pérenne, fait qu'aucun essai rationnel de fertilisation n'ait été tenté, à notre connaissance, dans de tels prés-vergers.

En marge de cette culture traditionnelle, se développent chaque année davantage depuis 1945, de nouveaux vergers conduits le plus souvent en buisson basse tige, parfois en haie fruitière qui se créent nécessairement hors des zones irrigables et qui, de ce fait, abandonnent toute couverture végétale au moins pendant les mois d'été. Dans ces situations nouvelles, la Station d'Agronomie de Clermont, sous la direction de G. GUYON, a mis en place, dès 1948, deux expériences concernant l'efficacité des engrais N P K appliqués chaque année en couverture après la plantation, et plus tard, en 1952, un troisième essai destiné à mettre en évidence l'efficacité de la fumure minérale apportée à la plantation en complément d'une fumure organique de fond.

A. — CONNAISSANCES ACTUELLES SUR LA FERTILISATION DU POMMIER

Les besoins des arbres fruitiers en éléments fertilisants, particulièrement ceux du Pommier, espèce de grande longévité, sont moins bien connus que ceux des plantes annuelles. Les plus grandes difficultés auxquelles se heurte l'expérimentation fruitière sont représentées par :

— *l'hétérogénéité individuelle*, toujours importante même sur des plants issus de greffons et de porte-greffes provenant des mêmes clones, d'où la nécessité d'opérer sur un grand nombre d'individus,

— *la longévité* des arbres qui entraîne des contrôles poursuivis pendant un temps très long,

— *le volume* des arbres soumis aux contrôles, obstacle majeur aux études physiologiques et aux mesures biométriques,

— le grand nombre des *adversités* auxquelles sont soumises les cultures fruitières : ravageurs animaux ou végétaux et fléaux atmosphériques.

Pour ces raisons *principales*, l'expérimentation fruitière exige des moyens importants et soutenus dont il est rare de disposer hors des domaines expérimentaux spécialisés.

Plusieurs auteurs (BOYNTON — GUYON — LIWERANT — TROCME) ont tenté d'évaluer les quantités d'éléments majeurs prélevés annuellement par le Pommier. De l'ensemble des estimations avancées, on retient les chiffres suivants exprimés en kg d'éléments pour une production de 20 t/ha fournie par des arbres adultes :

	N	P_2O_5	K_2O
	—	—	—
Prélèvements totaux	100-125	25-35	100-150
Retour au sol par les feuilles	60- 80	15-20	50- 60
Exportations par les fruits et immobilisation dans les organes pérennes	30- 50	10-20	50- 90

Si l'on tient compte du fait qu'en verger travaillé, les feuilles et les fleurs et souvent les bois de taille font partie des restitutions, on constate que les quantités exportées (fruits) ou fixées dans les tissus permanents de l'arbre (racines, troncs et branches) n'atteignent pas le niveau des exportations prélevées en moyenne par les cultures annuelles, et sont même très inférieures pour P_2O_5. Cette comparaison entre cultures fruitières et cultures annuelles placées dans les mêmes conditions de milieu, apparaît indispensable pour orienter les conseils de fertilisation. Elle met aussi en évidence le grand avantage des arbres fruitiers dans le domaine de l'exploration du sol et du sous-sol. En raison de leur pérennité et de la puissance de leur système radiculaire, les arbres exploitent plus intensément les couches profondes et surtout jouissent d'une possibilité d'absorption minérale quasi continue. Ce double avantage expliquerait les nombreux cas de vergers ne réagissant pas à la fertilisation sur des sols où les cultures annuelles présentent des réponses positives aux mêmes engrais.

En définitive, de l'ensemble des opinions émises par les spécialistes à l'issue d'essais culturaux, il ressort que la fertilisation azotée du Pommier doit augmenter avec l'âge de l'arbre et avec le drainage du sol et diminuer avec l'aptitude du sol à fournir de l'azote minéral. L'apport d'engrais phosphatés est considéré comme inutile dans la majorité des sols. Enfin, bien que le potassium soit l'élément le plus exporté par les récoltes, l'intérêt des engrais potassiques soulève de fréquentes controverses.

Les données expérimentales relatives à la période de formation du Pommier sont encore plus rares. A cette époque de la vie de l'arbre, le rôle le plus important est attribué à l'azote par son action favorable sur le développement de la charpente, bien qu'un excès de vigueur soit contraire à la mise à fruit. Parmi les chiffres avancés nécessaires à la satisfaction des besoins, il se dégage deux positions différentes :

Les uns (Trocme, Liwerant, les chercheurs anglais d'East Malling) admettent qu'une fertilisation moyenne de 50 — 80 unités/ha est suffisante pour assurer le développement convenable des arbres.

Les autres (Gouere et certains auteurs américains) préconisent d'apporter les éléments nutritifs en fonction de l'âge ou — mieux encore — de la grosseur du tronc. Cette thèse paraît plus rationnelle puisqu'elle s'appuie sur le développement de l'arbre. Dans ce système de fumure, l'azote est appliqué à raison de 110 à 140 g. par arbre et par année de plantation (américains) ou de 15 kg/ha/an d'âge (Gouere), ce qui conduit rapidement à des doses élevées. Il est juste cependant de préciser que la période dite de « formation » chevauche en partie la période de « production » au cours de laquelle il faut couvrir aussi les besoins supplémentaires de la récolte. Malgré cette remarque on dépasse nettement les chiffres moyens énoncés plus haut.

Mais ces deux doctrines ne sont pas nécessairement en contradiction. Il nous paraît important en effet que les vergers américains d'où sont issues les indications précédentes soient établis pour la plupart sur des sols de nature sableuse, pauvres en matières organiques. Il en est de même du verger expérimental de Sologne d'où proviennent les résultats obtenus par Gouere. Dans de telles conditions de milieu, la fourniture d'azote par le sol est faible et les pertes par drainage sont vraisemblablement élevées.

Il est un autre point qui mérite attention : la distribution dans le temps et dans l'espace des éléments fertilisants. Dans ce domaine, le problème majeur concerne la localisation des engrais phosphopotassiques qui sont retenus par le complexe

absorbant. On peut considérer que la culture fruitière conduit à un appauvrissement du sous-sol au bénéfice de la zone superficielle où se concentrent les restitutions par les feuilles et les fleurs, et les engrais appliqués en couverture. Le placement en profondeur des engrais phosphopotassiques est donc nécessairement avantageux, et des essais l'ont prouvé (DROUINEAU et NAGEOTTE, auteurs russes cités par LIWERANT)

B. — ESSAI DE FERTILISATION A LA PLANTATION.

L'essai a été entrepris *en présence d'une fumure organique classique* afin de contrôler l'efficacité de chaque élément fertilisant N,P et K sur la vigueur de la mise à fruits du Pommier.

1° MILIEU D'EXPÉRIENCE

Le verger expérimental est situé au château de Lavaur par Neschers (Puy-de-Dôme) à l'altitude de 400 m sur une terrasse ancienne qui domine de 30 m la Couze Chambon, et qui reçoit 550 mm de précipitations annuelles moyennes.

Le sol alluvial est très épais, profond de 1 m 50 au moins et contient quelques galets de nature surtout volcanique. Il a reçu des apports colluviaux en provenance du versant Sud de la vallée formé de sédiments stampiens qui expliquent son épaisseur, sa nature argileuse et sa saturation calcique. Le taux des matières organiques se trouve à un niveau normal pour la région. Ces caractères physiques confèrent au verger une forte capacité globale de rétention pour l'eau et la bonne qualité de la structure du sol assure un ressuyage satisfaisant; ce type de sol est à rapprocher des terres noires de Limagne.

TABLEAU I

Analyses du sol

Profondeur du sol	0,0-0,15			0,15-0,45	0,45-0,75	0,75-0,95	0,95-1,30
	min.	moyen.	maxi.				
P. mille de terre brute :							
Terre fine	900	870	820	870	902	763	940
P. mille de terre fine sèche :							
Capacité de rétention pour l'eau.		268		276	268	278	222
Analyse physique :							
M. O. T. (d'après C)	26	33,6	42,8	15	11	10	10
Calcaire total	0	6	18	20	13	13	tr.
Sables		467		476	478	437	520
Limon		158		152	142	210	173
Argile		332		320	343	314	281
Analyse chimique :							
pH		7,4		7,8	7,8	7,9	7,7
P_2O_5 (Dyer)	0,17	0,39	0,76	0,14	0,20	0,42	0,75
(Morgan Barbier		0,01		0,005	0,006	0,008	0,02
K_2O (échangeable	0,40	0,62	0,85	0,24	0,19	0,23	0,36
(Morgan Barbier	0,11	0,14	0,18	0,05	0,04	0,05	0,06

Ce sol est aussi bien pourvu chimiquement. Son complexe absorbant est saturé sur toute l'épaisseur du profil. Il est riche en potasse échangeable comme tous les sols argileux de Limagne et assez fourni en acide phosphorique quoique ces deux éléments soient à des niveaux relativement faibles dans la partie intermédiaire du profil.

2° DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

A l'automne 1951, après une culture de céréales, tout le champ a reçu du fumier de ferme à raison de 100 t/ha, enfoui par un labour à 0 m 45.

Six traitements ont été expérimentés : T — K et PK en absence et en présence de N.

T = Témoin sans fumure,

N = 0,5 k par arbre d'ammonitrate 20 p 100 épandu en couverture après plantation sur un rayon de 1 m 20 autour des arbres,

P = 2 k par arbres de super 16 p. 100)épandus en mars dans les trous

K = 4,8 k par arbre de sulfate 50 p. 100) de plantation.

Chaque parcelle élémentaire est composée de 9 arbres entourés en tous sens par des lignes neutres, hors expérience. Chaque traitement comprend 3 répétitions disposées par blocs.

En avril 1952, les scions de *Golden Delicious* sur *M II* ont été plantés suivant des écartements de 4 m sur une ligne et de 5 m en interligne, soit 500 arbres à l'ha.

Après plantation, le verger a été régulièrement entretenu indemne d'adventices et les arbres taillés pour former des buissons basse tige.

3° RÉSULTATS

Chaque année, avant le départ de la végétation, on a contrôlé le diamètre des troncs sous la ramification des charpentières et en 1956 et 1958 les deux premières récoltes produites par le verger. En 1955, la gelée a détruit presque totalement la première floraison importante.

TABLEAU 2

Action de N, P, K sur le rendement et la vigueur

	Sans N			Avec N		
	T	K	PK	T	K	PK
1952						
S	0,79	0,87	0,90	0,85	0,79	0,97
ΔS	20	9	8	14	9	5
1953						
ΔS	157	142	133	158	173	113
1954						
ΔS	209	235	224	214	202	225
1955						
ΔS	90	108	110	100	109	112
1956						
S	15,8	16,0	15,4	15,7	14,8	14,9
ΔS	70	73	74	73	72	73
R. brut	23,8	20,5	18,0	23,0	23,5	20,3
Indice	100	86	76	97	99	85
1957						
ΔS	96	89	98	92	97	102
1958						
S	52,6	52,5	53,0	52,1	50,2	52,2
ΔS	21	23	19	22	20	21
R. brut	52,8	44,4	44,3	51,8	53,9	51,4
Indice	100	85	85	98	102	97

R = Rendement moyen en kg/arbre.

S = Section moyenne en cm_2 mesurée à la sortie de l'hiver.

ΔS = Taux d'accroissement relatif annuel de la Section (% de S).

Sur le tableau des résultats, on a calculé la section moyenne du tronc et son accroissement relatif annuel qui donnent une expression correcte du grossissement des troncs. On constate que les arbres ont très peu grossi l'année de leur plantation mais ont triplé la section de leur tronc au cours du troisième cycle végétatif. Enfin, ils ont sensiblement ralenti leur croissance au cours des années de mise à fruit, surtout en 1958.

L'étude statistique a mis en évidence des corrélations linéaires très étroites entre le rendement et le diamètre des arbres, la productivité augmentant avec la grosseur du tronc.

Par contre, au cours des 7 ans d'expérience, les différents éléments de la fumure, y compris l'azote, n'ont exercé aucune action significative sur la vigueur des arbres ni sur la précocité et le volume de la fructification, malgré le grand nombre et l'homogénéité satisfaisante des arbres traités.

C. — ESSAIS DE FERTILISATION APRÈS LA PLANTATION

1° Milieux d'expérience

Deux essais ont été poursuivis à La Sauvetat et à Montaigut-le-Blanc dans le département du Puy-de-Dôme.

Le verger de la Sauvetat est situé à 400 m d'altitude dans la partie Sud de la Limagne, au centre d'une petite plaine particulièrement sèche, (moyenne annuelle des précipitations, environ 550 mm), sur des sols argileux et nettement calcaires, épais et par conséquent susceptibles d'emmagasiner des réserves d'eau appréciables.

TABLEAU 3

Analyse des sols

	La Sauvetat		Montaigut	
	Sud	Nord	Sol	Sous-sol
P.mille de terre brute :				
Terre fine	880	880	870	790
P. mille de terre fine sèche :				
Capacité de rétention	290	293	185	160
Analyse granulométrique :				
Sables grossiers	110	95	420	400
Sables fins	100	100	180	195
Sables très fins	120	120	60	60
Limon	305	355	120	115
Argile	365	330	220	230
Analyse chimique :				
pH	8,1	8,15	7,9	8,0
Calcaire total	286	304	40	56
M. O. T. (d'après C)	38,4	36,8	28,6	13,2
P_2O_5 Schlœsing de Sigmond	0,47	0,73	0,50	0,44
P_2O_5 Dyer	0,38	0,47	0,15	0,12
P_2O_5 Morgan-Barbier	0,006	0,006	0,006	0,004
K_2O Échangeable	0,62	0,82	0,47	0,24
K_2O Morgan-Barbier	0,09	0,14	0,15	0,07

Celui de Montaigut est placé à 8 km au Sud-Ouest du précédent (altitude 500 m) dans la vallée de la Couze Chambon. Son substratum est de nature alluviale, donc perméable, mais il a été amendé à sa partie supérieure par 1 m de colluvions argilo-calcaires, si bien que la capacité globale de rétention en eau du profil est assez bonne. De plus, ce verger reçoit des irrigations.

Du point de vue chimique, les deux expériences sont situées sur des sols calcaires, bien pourvus en potasse mais présentant des teneurs en acide phophorique moyennes ou faibles (P_2O_5 nitrique et citrique) et même très faibles (P_2O_5 Morgan-Barbier).

Les deux vergers bénéficient de façons culturales normales mais à La Sauvetat l'encombrement excessif des arbres a souvent interrompu les travaux d'entretien à partir de juillet.

Le verger de Montaigut comprend principalement des *Reinettes du Canada* hautes tiges greffées sur *Noir de Monton*, plantées en 1947 à 8 m en tous sens, soit 156 arbres/ha ; sur l'une des directions d'alignement, sont placés des intercalaires sur *M IX* qui ne font pas partie de l'essai.

Le verger de La Sauvetat date de 1946 ; et porte des *Reinettes du Mans* greffées sur *M II*, disposées en quinconce de 5 m (465 arbres/ha) et conduites en basse tige mais de forme libre. Des apports de fumier, à raison de 20 T/HA ont été appliqués pendant les premières années de l'essai.

2° DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Les deux essais ont été mis en place en mars 1948 soit 1 an (Montaigut) ou 2 ans (La Sauvetat) après la plantation.

Les traitements sont les suivants : T — N — K — NK — NPK — 2NP2K, et à La Sauvetat les traitements supplémentaires 2N et PK.

Les engrais ont été appliqués chaque année en février-mars en couverture sur une surface progressivement étendue, suivant les doses inscrite au tableau IV. En raison de la grande distance de plantation à Montaigut, les épandages n'ont affecté que la moitié de la surface, en moyenne, au cours de l'essai.

TABLEAU 4

Formes et doses d'engrais (en Kg d'éléments purs)

	La Sauvetat		Montaigut	
	par arbre	par ha	par arbre	par ha
N-Ammonitrate :				
1948 à 1950	0,065	30	0,130	40
1951 et suiv.	0,130	60	0,260	80
P_2O_5 :				
Bicalcique 1948 à 1950	0,110	50	0,110	35
Super 1951 et suiv.	0,160	75	0,190	60
K_2O :				
Sulfate de potassium { 1948 à 1950	0,200	90	0,250	80
Sulfate de potassium { 1951 à 1954 } Chlorure de potassium 1955 et suiv.	0,270	125	0,320	100
Quantités cumulées au cours de l'essai :	(1948-1956)		(1948-1958)	
N	0,975	450	2,470	760
P_2O_5	1,290	600	1,850	580
K_2O	2,220	1 025	3,310	1 040

Les deux expériences sont disposées suivant la méthode des blocs de Fischer, chaque arbre adjacent recevant une fumure différente, ce qui s'est révélé un disposif inadapté, en raison des interférences possibles d'un arbre à l'autre. A La Sauvetat, dès 1954, les parties aériennes de quelques pommiers parvenaient à se toucher. Cette raison nous a fait abandonner prématurément l'essai dès 1956.

De plus, les aléas inévitables ont affecté quelques arbres et ont ainsi réduit le nombre des blocs qui ont pu être soumis à l'analyse statistique : 11 blocs sur 13 à La Sauvetat et seulement 6 sur 10 à Montaigut ont conservé leurs arbres en bon état de végétation jusqu'au terme des expériences.

TABLEAU 5

Action des fumures sur la vigueur et le rendement

La Sauvetat

	T	N	2N	K	PK	NK	NPK	2NP2K
1949 S	5,6	5,6	6,0	4,7	5,5	5,0	4,9	6,2
$\triangle S$	20	13	18	20	12	22	17	16
1950 $\triangle S$	53	54	51	53	57	47	46	49
1951 $\triangle S$	74	84	84	90	78	90	87	84
1952 $\triangle S$	48	49	43	51	48	47	48	49
1953 $\triangle S$	48	42	51	48	51	52	52	42
1954 S	38,7	37,7	41,8	37,6	38,3	38,7	36,2	41,8
$\triangle S$	43	44	42	51	45	40	48	45
R. brut	23,6	32,7	29,5	22,6	31,8	29,1	28,2	26,5
R. ajusté	23,5	33,2	28,3	23,2	32,0	28,9	29,2	25,3
Indices	100	142	99	120	137	123	125	108
1955 $\triangle S$	27	28	27	27	28	33	29	27

R = Rendement moyen en kg/arbre.
S = Section moyenne en cm² mesurée à la sortie de l'hiver.
$\triangle S$ = Taux d'accroissement relatif annuel de la Section (% de S).

Montaigut-le-Blanc

	T	N	K	NK	NPK	2NP2K
1948 S	2,78	2,78	2,36	3,04	2,88	2,98
$\triangle S$	67	67	66	64	61	56
1949 $\triangle S$	49	45	38	40	34	55
1950 $\triangle S$	86	61	92	81	87	77
1951 $\triangle S$	58	67	68	58	67	65
1952 $\triangle S$	55	64	58	52	50	53
1953 $\triangle S$	48	47	54	51	50	52
1954 S	46,2	43,7	42,0	45,6	45,0	48,6
$\triangle S$	23	22	25	22	23	24
R. brut	26,5	23,4	21,8	26,2	24,0	25,9
R. ajusté	26,3	24,0	22,9	26,0	24,1	24,7
Indice	100	92	87	101	92	94
1955 S	56,6	52,7	52,6	56,0	55,3	60,5
$\triangle S$	30	31	27	31	35	32
R. brut	13,8	10,2	9,6	15,1	1,8	2,21
R. ajusté	13,2	11,5	10,9	14,5	1,8	0
Indice	100	87	83	110	14	
1956 S	73,8	69,2	66,8	73,4	75,0	80,0
$\triangle S$	9	14	12	8	10	13
R. brut	43,3	64,8	53,1	66,7	64,9	66,4
R. ajusté	42,1	67,2	57,9	65,5	62,5	60,4
Indice	100	159	155	156	148	143
1957 $\triangle S$	14	10	10	14	14	14
1958 S	91,0	86,8	83,3	91,2	93,0	102,0
$\triangle S$	16	20	20	18	18	14
R. brut	60,6	69,2	65,3	73,2	76,5	78,2
R. ajusté	61,8	72,9	71,4	73,2	75,3	70,7
Indice	100	118	115	119	122	114
Rendements cumulés (1954-1958)						
R. bruts	144,2	167,6	149,8	181,2	167,2	172,7
Indices	100	116	104	126	116	120
R. ajustés	143,5	175,6	163,1	179,2	163,7	155,8
Indices	100	122	144	125	114	109

3° RÉSULTATS

Les contrôles ont porté chaque année sur le diamètre des troncs, mesuré systématiquement à la même hauteur avant le départ en végétation, et sur le poids des récoltes, y compris les fruits atteints de pourriture à la cueillette.

a) *Effets des fumures sur la croissance*

D'une manière générale, l'augmentation relative annuelle de la section des arbres tend à s'abaisser avec l'âge, surtout à partir de la mise à fruit. Mais on observe des différences parfois importantes d'une année à l'autre, qui semblent liées à la pluviométrie ; ainsi, l'extrême sécheresse de 1949 est vraisemblablement responsable de la faible croissance, déficiente surtout à La Sauvetat où aucune irrigation n'a été appliquée.

Les fumures appliquées n'ont jamais exercé d'action significative sur le grossissement annuel des diamètres ; même après 11 ans de fertilisation à Montaigut, les effets cumulés des engrais n'ont pas accru significativement la croissance des arbres bien que la dose double d'azote ait eu tendance à favoriser légèrement la vigueur. Il en résulte que les différences de diamètre enregistrées sont le fait de la variabilité du matériel végétal et non des traitements appliqués.

D'autre part l'étude statistique a mis en évidence que la récolte des arbres est très étroitement proportionnelle à leur vigueur. Il existe cependant une limite à cette corrélation puisque en 1954, lors de la mise à fruit du verger de La Sauvetat, les plus gros arbres, dont la section était supérieure à 50 cm² (diamètre $\geqslant$ 80 mm) n'ont pas présenté le rendement moyen le plus élevé, confirmant ainsi l'opinion classique qu'un excès de vigueur est susceptible de nuire aux premières récoltes.

En règle générale, au cours des essais, les arbres ont conservé leur vigueur relative. Il en résulte que les arbres les plus vigoureux ont porté chaque année les plus grosses récoltes. Dés lors, on se rend compte du capital considérable que représentent la vigueur et la santé des plants et par conséquent du soin qu'il faut apporter à leur arrachage en pépinière et à leur plantation.

b) *Effet des fumures sur le rendement*

En raison des corrélations rencontrées entre le diamètre et le rendement, on a procédé chaque année à l'analyse de la covariation des résultats de façon à éliminer l'influence de la vigueur. Les rendements réels contrôlés ont donc été ajustés au diamètre moyen de la population de chaque essai par application de la régression correspondante.

Malgré l'élimination de ce facteur de variation, l'analyse statistique n'a pas décelé de différence significative à $P = 0{,}05$ dans aucune des récoltes contrôlées, ni sur les productions cumulées. L'insuffisance des répétitions dans les deux expériences et la grande variabilité des rendements au sein de chaque traitement ont engendré de fortes variances de l'erreur expérimentale.

c) *Effets des fumures sur les caractères chimiques du sol*

A la fin des essais, on a prélevé des échantillons de sols dans la couche travaillée (0 à 10 cm) et dans la partie sous-jacente (10 à 20 cm) sous les arbres ayant reçu soit

la fumure la plus copieuse (2N.P.2K) soit la seule fumure azotée (N). Il a été possible ainsi de mesurer la répercussion des fumures phosphopotassiques sur les caractères analytiques du sol.

On constate dans les 2 essais que les engrais phosphatés ont surtout influencé le phosphore extrait par le réactif acétoacétique de Morgan, mais que l'extrait citrique accuse aussi l'enrichissement du sol.

TABLEAU 6

Action des engrais sur les caractères analytique des sols

(moyennes de 5 répétitions exprimées en p. mille de terre fine sèche)

Nature des traitements	La Sauvetat				Montaigut			
	2N		2NP2K		N		2NP2K	
Profondeur des prélèvements en cm	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20	0-10	10-20
P_2O_5 :								
Dyer	0,46	0,40	0,71	0,43	0,28	0,20	0,47	0,29
Morgan-Barbier	0,012	0,010	0,023	0,007	0,025	0,011	0,060	0,024
K_2O :								
Morgan-Barbier	0,27	0,06	0,52	0,08	0,41	0,34	0,69	0,40
Bases échangeables :								
K_2O	1,40	0,61	2,02	0,63	1,05	0,83	1,43	1,04
CaO	7,75	8,0	7,6	7,85	4,16	4,05	4,25	3,88
MgO	0,42	0,42	0,35	0,36	0,25	0,22	0,14	0,19

Les engrais potassiques ont exercé également une action nette aussi bien sur la potasse échangeable que sur la potasse Morgan-Barbier. Le plus surprenant est la différence de niveau des taux de K_2O comparativement à celui mesuré — en simple il est vrai — au début des essais. Par ailleurs, à La Sauvetat, la potasse de la zone superficielle du traitement 2N est trop supérieure à celle du niveau suivant ; ce saut doit être la conséquence des apports de fumier pratiqués systématiquement sur l'ensemble du dispositif au cours des premières années.

La comparaison des taux de P_2O_5 et de K_2O trouvés dans la couche inférieure à 10 cm prouve que les engrais phosphopotassiques n'ont pas atteint ce niveau à La Sauvetat et l'ont légèrement enrichi à Montaigut où le sol est moins argileux et reçoit des irrigations. Ces constatations confirment la très faible migration en profondeur des éléments phosphopotassiques dans les sols argileux.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Ainsi, dans sa période de jeunesse, le Pommier n'a pas réagi aux éléments fertilisants appliqués soit à la plantation soit avant la mise à fruits. Ces conclusions négatives surprendront peut-être mais il importe de rappeler les conditions pédologiques dans lesquelles les trois essais ont été poursuivis.

Les vergers expérimentaux sont établis sur des sols argileux et profonds, bien structurés, susceptibles d'emmagasiner de grandes réserves hydriques et de minéraliser des quantités appréciables d'azote organique, possédant enfin un potentiel chimique relativement élevé. Il est certain que les sols de ces vergers doivent présenter au maximum la fertilité chimique naturelle déjà signalée par l'un de nous pour les terres noires de Limagne, par suite de la présence en quantité dans ces terres argilo-calcaires d'éléments de roches granitiques et surtout volcaniques sur toute la profondeur du profil.

Dans le cas des expériences entreprises après la plantation, le dispositif expérimental n'a pas été conçu avec le souci d'éviter les interférences possibles entre arbres voisins soumis à des traitements différenciés ; de même, l'application en couverture des engrais phosphopotassiques et leur concentration dans la couche superficielle pourrait expliquer leur inefficacité. Dans l'essai de fumure à la plantation cette dernière remarque perd de la valeur puisque la localisation dans le trou de plantation a été expérimentée ; mais, l'incorporation d'une abondante fumure organique de fond a peut-être masqué les effets éventuels des engrais minéraux.

Malgré ces critiques, nous sommes portés à croire que, dans le système de culture et le type de sol considérés, le jeune Pommier, greffé sur *M II*, ne tire pas bénéfice des engrais. Cette interprétation s'appuie sur plusieurs observations. D'abord, les arbres témoins des trois expériences attestent une vigueur et un rendement tout à fait satisfaisants. Ensuite, les pertes d'azote sont négligeables car de tels sols ne drainent pas en général. Enfin, les cultures annuelles placées dans les mêmes conditions de milieu ne réagissent pas non plus aux engrais phosphopotassiques ; comme le Pommier est unanimement considéré comme moins exigeant que les cultures annuelles, les résultats négatifs de nos essais ne surprennent pas.

Les conclusions de ces expériences sont cependant incomplètes car elles n'apportent aucun élément sur le comportement futur des arbres. Parvenus à l'état adulte ou sénile, ces mêmes arbres auraient peut-être réagi un jour à l'enrichissement chimique du sol. Le doute ne sera levé qu'après des expériences portant sur toute la longévité du Pommier qui doit être de l'ordre du siècle pour des porte-greffes aussi vigoureux que *M II*.

Pour les motifs évoqués plus haut, on peut avancer que l'apport de potasse, et surtout d'acide phosphorique, est inutile après la plantation dans la plupart des sols argilo-calcaires de Limagne. Cependant, par mesure de sécurité, en raison de l'insuffisance de nos connaissances actuelles, nous considérons que l'enfouissement au défonçage d'une fumure phosphopotassique de fond devrait être la règle générale même en sols riches. En effet, en cas de déficience alimentaire qui se manifesterait lorsque les arbres seraient âgés, il n'est pas certain que des apports curatifs localisés au moyen d'une sous-soleuse présentent autant d'efficacité qu'un enrichissement préventif uniformément distribué.

L'alimentation azotée est plus facile à assurer en raison de la mobilité des nitrates, mais elle est liée à l'activité biologique du sol, elle-même dépendante de la qualité de la stucture. Lorsque la stabilité de la structure est bonne, il suffit de la conserver par des apports réguliers de matières organiques. S'il est nécessaire d'améliorer la stabilité structurale l'enherbement permanent est excellent mais il présente les inconvénients d'augmenter la concurrence pour l'eau et les éléments nutritifs et de ralentir l'activité biologique. L'enfouissement d'une copieuse fumure organique

par le labour profond qui précède la plantation poursuit ce double but et devrait être toujours réalisé ; à défaut de fumier, on peut faire précéder la plantation d'un bon engrais vert. Dans ces conditions préalables, l'apport d'engrais azoté à la plantation pourra être inutile, surtout si le sol est profond, alors qu'il est indispensable au contraire si le verger succède immédiatement au défrichement de vieilles pelouses.

Après la plantation, la pratique d'un engrais vert d'arrière saison et d'hiver est susceptible de réaliser harmonieusement l'entretien de la structure du sol et de l'alimentation azotée des arbres. Il semble que le choix de l'engrais vert devrait être orienté en fonction du but essentiel recherché. S'il s'agit avant tout de stabiliser la structure, les graminées — céréales ou Ray Grass d'Italie — sont préférables en raison de leur système radiculaire finement divisé ; elles recevront une fumure azotée variant de 50 à 100 unités/ha suivant l'azote fourni par le sol. Dans le cas de sols à structure stable, tels que les sols de Limagne, il apparaît judicieux d'associer une légumineuse à une céréale dans le but de réaliser une économie partielle d'engrais azoté. Des essais comparatifs poursuivis par le C. E. T. A. des Fruits d'Auvergne en 1959 et 1960 ont montré que les diverses légumineuses expérimentées (Vesce d'hiver, Vesce d'été, Pois d'hiver et Féverole d'hiver) produisent des rendements semblables.

Reçu pour publication en juillet 1961.

SUMMARY

THE FERTILIZING OF APPLE ORCHARDS IN CALCAREOUS — CLAY SOILS OF THE AUVERGNE EXPERIMENTS AT THE TIME AND AFTER PLANTING.

The results are reported of three fertilizing trials with the apple varieties of Reinette blanche du Canada and Reinette du Mans.

One of the trials deals with the efficiency of N, P and K applied at the time of planting. The vigour and production of trees is recorded for a period of seven years.

The two other experiments deal with 1 — and 2 — year — old nurseries to which annual tops — dressings of fertilizers were given for 9 — 11 years.

In the clayey and deeps soils of the Limagne, where the nutrient supply is satisfactory, there was no response of young apple trees to the fertilizers investigated.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE DÜNGUNG DES APFELS IN DEN KALK-TONBÖDEN DER AUVERGNE. (ERFAHRUNGEN BEI UN NACH DER PFLANZUNG.)

Die Verfasser geben die Resultate dreier Dungungsversuche fur Apfel, Sorte weisse Kanada-Reinette und Reinette du Mans, auf M 11 gepfropft, in bearbeitetem Boden bekannt.

Der eine Versuch untersucht die Wirksamkeit der Nährstoffe N, P und K, die bei der Pflanzung gegeben wurden. Wuchs und Ertrag sind seit 7 Jahren der Prüfung unterworfen.

Die beiden anderen Versuche betreffen ein und zweijährige Anlagen die während 9 und 11 Jahren jedes Jahr Kopfdünger erhielten.

In den tiefgründigen Lehmböden der Limagne, chemisch gut mit Nährstoffen versorgt, haben die jungen Apfel stämme nicht auf die verschiedenen Probe-Düngungen reagiert.

Подкормка яблонь в глинисто-известковых почвах Оверни. Опыты во время и после посадок.

Л. ГАШОН и Д. КОЛЬЕ (Клермон-Ферран).

Даются результаты трех опытов подкормки яблонь сортов « Белый Канадский Ренет » и « Манский Ренет » привитых на М. II в обрабатывавшемся саду.

В первом из опытов изучалась эффективность элементов N, P и K принесенных в насаждение. Мощность и продуктивность деревьев проверялись в течении семи лет.

Два других опыта касались однолетних и двухдетних посадок получавших каждый год в течении 9-ти и 11-ти лет только поверхностные удобрения.

В глинистых и глубоких почвах провинции Лимань насыщенных удобряющими элементами, молодые яблони не реагировали на испробованные различные удобрения.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BARBIER G., 1955. Comment fumer raisonnablement les cultures maraîchères et fruitières en l'absence d'expérimentation locale. *Journ. fruit. maraîch. Avignon*

BOYNTON D., 1954. Apple nutrition. *in Fruit nutrition.* N. F. Childers Editor.

CHANDLER W. H., 1957. Deciduous orchards — Lea and Febiger, Philadelphia.

COLLIER D., 1949. Contribution à l'étude des terres noires de la Limagne d'Auvergne ; constitution et genèse *Ann. agron.*, **1**, 94.

DERMINE E., 1952. Les besoins alimentaires des arbres fruitiers, *Fruit belge* **135**, 161-166.

DROUINEAU G., NAGEOTTE M., 1940. Influence du mode d'application d'une fumure complète sur la nutrition des arbres fruitiers. Recherches de la fertilisation effectuées par les Stations Agronomiques, 50.

GACHON L., 1956. Contribution à l'écologie de la *Reinette blanche du Canada* en Auvergne. *Ann. agron.* 219-276.

GARDNER V. R., BRADFORD F. C., HOOKER H. D., 1952. Fundamentals of fruit Production. Mac Graw Hills Co.

GOUERE A., 1956. Dix années d'études de la fumure azotée en culture intensive du Pommier. *C. R. Congr.. Pomol. Namur.*

GUYON G., 1948. Sur le dépérissement du pommier de pré-verger dans le Massif Central. . *Ann. agron.*,593-606.

LIWERANT J., 1953. La fumure des arbres fruitiers. *Bull. Techn. Inf.*, **81**, 575-581.

LIWERANT J., 1957. Quelques aspects des problèmes de la fumure en culture fruitière. *C. R. Congr. Pomol. Toulouse.*

LIWERANT J., 1960. Évolution des méthodes de fumure en arboriculture fruitière. *Journ. fruit. rég., Valence.*

MIALLET P., 1948. Problèmes d'arboriculture fruitière aux U. S. A. *Ann. agron.*, 245-303.

TROCME S., 1954. Fumure des arbres fruitiers et carences. *Journ. fruit. maraîch. Avignon.*

Ann. agron., 1961, **1** (4), 449-469.

545. 82

LA SPECTROPHOTOMÉTRIE DIFFÉRENTIELLE

J. CHAUSSIDON.
Station centrale d'Agronomie,
Centre national de Recherches agronomiques, Versailles.

SOMMAIRE

La spectrophotométrie différentielle est une méthode d'absorptiométrie de précision. Les données théoriques sont décrites en détail. Une liste des applications récentes de la méthode est donnée en conclusion.

I. — INTRODUCTION

Les perfectionnements apportés au cours des douze dernières années aux appareils de spectrophotométrie, ont conduit un certain nombre de chercheurs à établir les bases théoriques et pratiques d'une méthode d'absorptiométrie de précision.

Dès 1949 on voit apparaître dans la littérature spécialisée, des articles détaillés consacrés à l'évaluation de la précision dans l'analyse photométrique (voir en particulier AYRES 1949). C'est à la même époque que deux analystes américains, HISKEY 1949 et BASTIAN 1949, publient les premiers travaux concernant la spectrophotométrie différentielle.

Jusqu'en 1952 des articles théoriques dus surtout à HISKEY et ses collaborateurs se succèdent. Parallèlement, les dosages mettant en œuvre cette technique se développent, avec, semble-t-il, le plus grand nombre de publications dans l'année 1956. En 1955, une théorie généralisatrice est proposée par REILLEY et CRAWFORD (1955).

Dans ce qui suit, nous nous attacherons essentiellement à étudier les aspects théoriques de la spectrophotométrie différentielle. Les méthodes de dosage chimique proprement dites qui font appel à ce procédé, n'utilisent en général que des réactions bien connues, et les détails strictement analytiques tels que le choix des conditions les meilleures pour l'établissement de la réaction colorée, ou l'étude des interférences, n'ont pas à intervenir dans cet exposé.

Nous rappellerons néanmoins sous une forme synoptique, la majorité des dosages mentionnés depuis 1949, et nous en choisirons un ou deux pour montrer d'une façon détaillée comment la théorie peut être appliquée.

La méthode étudiée est essentiellement destinée à doser avec précision un élément qui entre, pour une très grande fraction, dans la composition d'un mélange (alliages à haute teneur en un métal donné, minerais riches, métaux technologiquement purs comme nickel des électrodes des tubes électroniques par exemple).

Lorsque la pureté d'un produit doit être de l'ordre de 98 à 100 p. 100, il est souvent très difficile de doser les impuretés, pour faire ensuite la différence et déterminer l'élément majeur. Un dosage direct de l'élément majeur est à recommander, dans la mesure où, toutefois, la précision de l'opération est de l'ordre de 1 à 2 pour mille. Dans ce cas, les méthodes colorimétriques ordinaires ne peuvent être utilisées.

La spectrophotométrie différentielle permet d'atteindre cette précision, tout en conservant à l'analyse les avantages classiques de la spectrophotométrie, rapidité et souvent, grande sélectivité.

II. — DONNÉES THÉORIQUES

On ne peut présenter la spectrophotométrie différentielle, sans procéder au départ à une analyse complète de trois articles de HISKEY (1949, 1951, 1952), parus successivement en 1949, 1951 et 1952.

A. — THÉORIE DE HISKEY

1° *Systèmes suivant la loi de* BEER

Considérons trois cuves géométriquement identiques, contenant respectivement le solvant, et le corps coloré à deux concentrations c_1 et c_2. Si la lumière incidente I est maintenue constante, et si la loi de BEER est suivie aux deux concentrations choisies, on a, en notant a le coefficient d'extinction et b la longueur du chemin optique dans la cuve.

$$I_1 = I_0 10^{-abc_1}$$
$$I_2 = I_0 10^{-abc_2}$$

en définissant I_0 comme l'intensité lumineuse émergeant de la cuve qui contient le solvant.

On peut définir le rapport des transmissions.

$$\frac{I_2}{I_1} = 10^{-ab(c_2-c_1)} = 10^{-ab\Delta c}$$

avec $\Delta c = c_2 - c_1$

Si l'on utilise le rapport des concentrations

$$\frac{c_2}{c_1} = \frac{c_1 + \Delta c}{c_1} = \alpha$$

on a :

$$\Delta c = c_1(\alpha - 1) = c_2\left(\frac{\alpha - 1}{\alpha}\right)$$

d'où :

$$\frac{I_2}{I_1} = 10^{-abc_1(\alpha-1)} = 10^{-A_1(\alpha-1)}$$

en posant $A_1 = abc_1$ = densité optique du corps coloré à la concentration c_1.

La détermination spectrophotométrique de la concentration c_2 peut se faire selon la méthode usuelle en comparant c_2 au solvant.

La méthode différentielle consistera à remplacer le solvant par un étalon de référence coloré tel que c_1, de concentration un peu inférieure à c_1.

Si la réponse du spectrophotomètre peut se lire sur une graduation de 0 à 100 (échelle des pourcentages de transmission par exemple), on effectue en colorimétrie ordinaire deux réglages qui sont :

0 p. 100 T pour le courant d'obscurité

100 p. 100 T pour le solvant.

En colorimétrie différentielle, on effectuera les deux réglages suivants :

0 p. 100 T pour le courant d'obscurité

100 p. 100 T pour l'étalon de référence de concentration c_1

Cette opération revient à faire un décalage d'origine optique où les proportions sont conservées, si le photoélément a une réponse électrique linéaire en fonction de l'éclairement.

Le rôle de $A_1 = abc_1$ apparaît mieux si l'on trace les courbes

$$\frac{I_2}{I_1} = f(A_1) \quad \text{(fig 1)}.$$

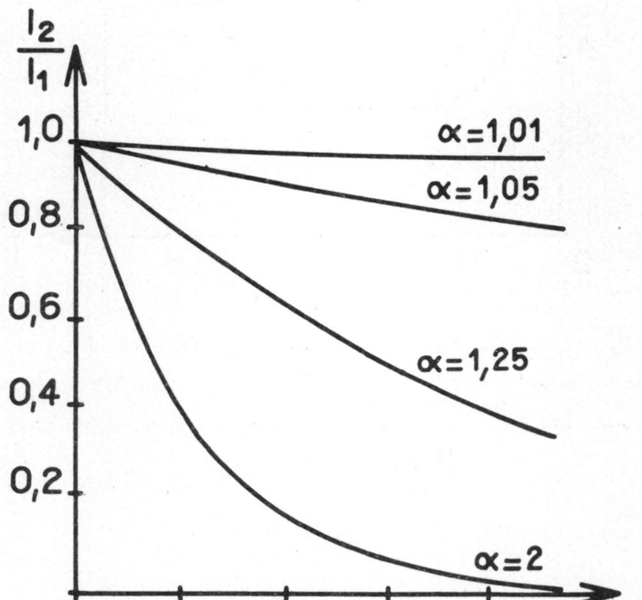


FIG. 1.

Il est clair que pour un Δc donné, $\frac{I_2}{I_1}$ est d'autant plus grand que A_1 est grand.

Par exemple, pour $A_1 = 1,7$ et $\alpha = 1,01$, on a $\frac{I_2}{I_1} = 0,96$. Si l'échelle du spec-

trophotomètre permet de lire une différence de 0,5 p. 100 T, un rapport $\alpha = 1{,}0012$ peut être détecté.

On montre classiquement que pour une détermination spectrophotométrique de la concentration c_1, l'erreur relative $\frac{dc_1}{c_1}$ est de la forme.

$$\frac{dc_1}{c_1} = \frac{0{,}4343\,\Delta\,\frac{I_1}{I_0}}{\frac{I_1}{I_0}\log\frac{I_1}{I_0}}$$

avec $\frac{I_1}{I_0}$ = coefficient de transmission.

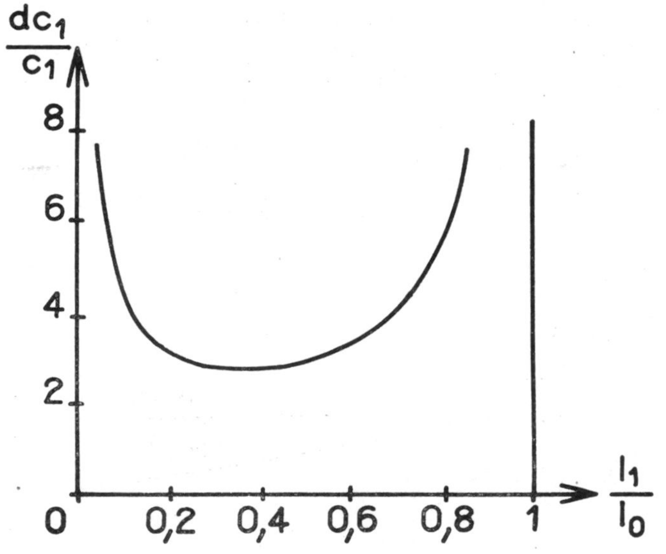


FIG. 2.

La courbe $\frac{dc_1}{c_1} = f\left(\frac{I_1}{I_0}\right)$ (fig. 2), tracée en affectant à $\Delta\,\frac{I_1}{I_0}$ une valeur constante (c'est l'incertitude de lecture sur l'échelle des transmissions, constante pour un appareil) passe par un minimum pour $\frac{I_1}{I_0} = 0{,}368$, avec en fait une zone où la fonction d'erreur a une valeur pratiquement minima pour $0{,}200 < \frac{I_1}{I_0} < 0{,}650$.

Il est nécessaire de calculer l'erreur correspondante en spectrophotométrie différentielle. C'est $\frac{dc_2}{c_2}$

On a

$$\frac{dc_2}{c_2} = \frac{d(\Delta c)}{c_2} = \frac{d(\alpha - 1)}{\alpha} = \frac{d\alpha}{\alpha}.$$

En effet :

$$\alpha - 1 = \frac{\alpha\Delta c}{c_2} \qquad \text{et} \qquad d(\alpha - 1) = \alpha\,\frac{d\Delta c}{c_2}.$$

Or, on sait que

$$\log \frac{I_2}{I_1} = - abc_1(\alpha - 1)$$

On en tire

$$\alpha - 1 = - \frac{1}{abc_1} \log \frac{I_2}{I_1}$$

et

$$\alpha = 1 - \frac{1}{abc_1} \log \frac{I_2}{I_1} = \frac{abc_1 - \log \frac{I_2}{I_1}}{abc_1}$$

d'où

$$d\alpha = - \frac{0{,}4343}{abc_1} \frac{d \frac{I_2}{I_1}}{\frac{I_2}{I_1}}.$$

Il vient alors

$$\frac{d\alpha}{\alpha} = \frac{dc_2}{c_2} = - \frac{0{,}4343}{abc_1} \cdot \frac{d \frac{I_2}{I_1}}{\frac{I_2}{I_1}} \cdot \frac{abc_1}{abc_1 - \log \frac{I_2}{I_1}}.$$

Finalement, en introduisant $- \log \frac{I_1}{I_0} = abc_1$, on obtient

$$\frac{dc_2}{c_2} = \frac{0{,}4343\, d \frac{I_2}{I_1}}{\frac{I_2}{I_1}\left(\log \frac{I_1}{I_0} + \log \frac{I_2}{I_1}\right)}.$$

D'après cette expression on voit que $\frac{dc_2}{c_2}$ dépend de $\frac{I_2}{I_1}$ comme $\frac{dc_1}{c_1}$ dépend, dans le calcul précédent de $\frac{I_1}{I_0}$.

Deux points particuliers sont à souligner :

— quand $\frac{I_1}{I_0} < 1$, $\frac{dc_2}{c_2}$ diminue en fonction de $\frac{I_2}{I_1}$

— pour $\frac{I_2}{I_1} = 1$, l'erreur $\frac{dc_2}{c_2}$ prend une valeur finie.

Il y a donc toujours un gain relatif de précision, en remplaçant le solvant par un étalon de référence coloré.

Les courbes $\frac{dc_2}{c_2} = f\left(\frac{I_2}{I_1}\right)$ sont représentées pour différentes valeurs de A_1, dans la figure 3.

On observe que le minium d'erreur sur l'échelle des transmissions relatives progresse de 0, 368 à 1.

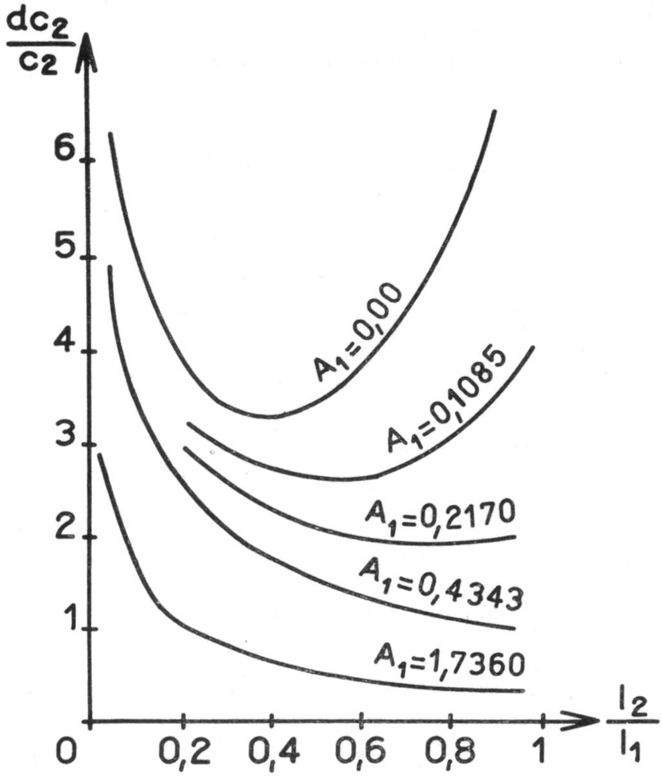


FIG. 3.

2° *Systèmes ne suivant pas la loi de* BEER.
Méthode des a'c maxima

En fait, ce traitement n'est valable que si la loi de BEER s'applique. Or, souvent on observe des déviations par rapport à cette loi, avec les solutions à densité optique élevée. Des calculs supplémentaires sont alors rendus nécessaires pour déterminer la valeur la plus appropriée de c_1.

Les déviations les plus fréquemment observées dans ce cas, sont des déviations négatives, dues à une mauvaise définition de la bande passante. Quand l'absorption de l'étalon est élevée, en effet, il est nécessaire d'ouvrir beaucoup la fente pour faire le réglage 100 p. 100 T avec c_1. Si alors la largeur de la bande passante est supérieure ou égale à celle de la bande d'absorption, il y a une déviation.

Considérons donc un système non idéal dont le comportement est schématisé par la figure 4. La courbe des absorptions en fonction des concentrations possède une partie linéaire de coefficient d'extinction a, et une partie courbe telle que à c_1 corresponde A_1.

Tout se passe comme si l'on avait

$$A_1 = a'c_1 + (A_1 - a'c_1) = a'c_1 + X$$

en notant a' la pente de la tangente à la courbe en A_1.

Le coefficient d'extinction ne peut plus être considéré comme constant, mais doit être pris comme valeur intégrale de la pente entre $c = 0$ et $c = c_1$.

On a donc, en notant a_m ce coefficient d'extinction :

$$A = \log \frac{I_0}{I} = a_m bc.$$

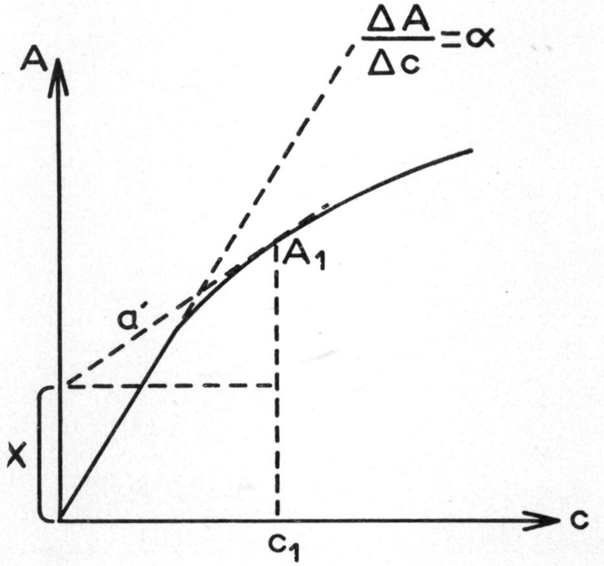


FIG. 4

Pour toute concentration c_1 d'absorption A_1, on peut définir un coefficient d'extinction apparent a', tel que

$$a' = \left(\frac{dA}{dc}\right) c_1.$$

On a alors :

$$dc = -\frac{1}{a'b}\, d \log \frac{I}{I_0}$$

et l'erreur relative est :

$$\frac{dc}{c} = -\frac{1}{a'b}\, d \log \frac{I}{I_0} \cdot \frac{a_m b}{-\log \frac{I_0}{I}}$$

soit :

$$\frac{dc}{c} = \frac{0{,}4343\, a_m\, d \frac{I}{I_0}}{a' \frac{I}{I_0} \log \frac{I}{I_0}}$$

Cette erreur diffère de l'erreur d'un système qui suit la loi de BEER, par le terme $\frac{a_m}{a'}$. L'erreur relative d'une solution non idéale est donc $\frac{a_m}{a'}$ fois plus grande que pour un système idéal.

$\frac{A'}{c_1}$ apparait comme un coefficient d'extinction moyen. Il est maximum au début, puis décroît quand c augmente, ce qui entraîne une déviation accrue. a' décroît aussi quand c augmente, mais plus vite que $\frac{A'}{c_1}$.

On voit facilement que

$$\frac{a_m}{a'} = \frac{\frac{A_1}{bc}}{\frac{A_1 - X}{bc}} = \frac{A_1}{A_1 - X} = \frac{A_1}{a'c_1}.$$

Dans le cas de mesures relatives ou l'étalon de référence a une absorption A_1 et l'inconnu une absorption A_2 on a, en notant

$$\alpha = \frac{a'c_2}{a'c_1}$$

et en considérant, pour alléger le symbolisme, une longueur du chemin optique dans les cuves égale à l'unité, soit $b = 1$,

$$\frac{I_1}{I_0} = 10^{-A_1} = 10^{-(a'c_1+X)}$$

$$\frac{I_2}{I_0} = 10^{-A_2} = 10^{-(a'c_2+X)}$$

et

$$\frac{I_2}{I_1} = 10^{-a'c_1(\alpha-1)}.$$

La fonction d'erreur s'écrit, tous calculs faits :

$$\frac{dc_2}{c_2} = \frac{0{,}4343\; d\,\frac{I_2}{I_1}}{\frac{I_2}{I_1}\left(\log\frac{I_2}{I_1} - a'c_1\right)}.$$

Si l'on se place dans des conditions telles que c_1 soit très voisin de c_2, on a

$$\frac{I_2}{I_1} \# 1\ ;\ \log\frac{I_2}{I_1} \# 0.$$

L'erreur minima est alors obtenue pour $a'c_1$ maximum.

On étudiera donc les relations entre $\frac{I_2}{I_1}$ et c_1, en effectuant plusieurs séries de mesure avec différents étalons de référence.

On choisira c_1 pour que le produit $a'c_1$ soit le plus élevé possible.

HISKEY propose une autre méthode pour déterminer la concentration la plus appropriée de l'étalon de référence c_1.

Elle consiste à noter les largeurs de fente utilisées. Soient S_0 la largeur de fente permettant 100 p. 100 T avec le solvant, S la largeur de fente permettant 100 p. 100. T avec l'étalon coloré.

On a

$\frac{I_1}{I_0} = \left(\frac{S_0}{S}\right)^r$, avec $r = 2$ pour un spectrophotomètre parfaitement aligné. Dans ces conditions on peut écrire :

$$\log \frac{I}{I_0} = r \log \frac{S_0}{S} = - abc$$

et

$$a = \frac{r}{bc} \log \frac{S}{S_0}.$$

On a également

$$a_m = \frac{A}{bc} = \frac{r}{bc} \log \frac{S}{S_0}$$

et :

$$a' = \left(\frac{\Delta A}{\Delta c}\right)_{c_n + 1/2} = \frac{r}{bc} \log \frac{S_n + 1}{S_n}$$

avec le système de concentrations c_1. c_2... c_n... c_p.

On calcule alors les produits $a'c$ et l'on choisit la valeur maximum.

En principe, d'autres effets que la déviation du système par rapport à la loi de BEER, doivent être considérés.

HISKEY étudie à ce propos les effets de la température et de l'indice de réfraction.

Il s'agit là de deux termes correctifs mineurs. En effet, on peut le plus souvent rendre très facilement voisines les températures de la solution inconnue et de l'étalon ; quant aux variations dues à la différence des indices de réfraction, elles sont à relier à la correction de FRESNEL concernant la lumière réfléchie normalement par les interfaces optiques. Les concentrations c_1 et c_2 étant en général voisines, cet effet est de peu d'importance.

3° *Systèmes à deux composants en mélange.*

Dans le dernier des trois articles que nous avons mentionnés au début de cet exposé. HISKEY envisage le cas où deux composants sont présents dans la solution à analyser.

Soient x et y ces composants, dont les maximum d'absorption se trouvent respectivement aux longueurs d'onde λ' et λ''.

On a, en désignant par A' et A'' les absorptions à λ' et λ''

$$A' = A'_x + A'_y = a_x c_x + a'_y c_y$$
$$A'' = A''_x + A''_y = a_x' c_x + a''_y c_y.$$

On en tire en éliminant successivement c_x et c_x :

$$c_x = \frac{\frac{A'}{a_x} - \frac{A''}{a_y'} \cdot \frac{a'_y}{a'_x}}{1 - \frac{a'_y}{a'_x} \cdot \frac{a''_x}{a''_y}}$$

et :

$$c_y = \frac{\dfrac{A''}{a_y''} - \dfrac{A'}{a_x'} \cdot \dfrac{a_x''}{a_y''}}{1 - \dfrac{a_x''}{a_y''} \cdot \dfrac{a_y'}{a_x'}}.$$

Ces résultats sont valables en spectrophotométrie ordinaire.

Dans le cas des mesures relatives, on compare un étalon de référence d'un des constituants à la solution inconnue. La mesure s'effectue à la longueur d'onde d'absorption de l'étalon de référence.

La même opération est faite avec l'autre composant.

On alors le système

$$a_x'c_x + a_y'c_y = a_x'c_x^s + \log\left(\frac{I_x}{I_m}\right)'$$
$$a_x''c_x + a_y''c_y = a_y'c_y^s + \log\left(\frac{I_y}{I_m}\right)''$$

en désignant par

c_x^s et c_y^s les concentrations des étalons de référence et $\log \frac{I_x}{I_m}$ et $\log \frac{I_y}{I_m}$ les différences d'absorption entre l'étalon et les solutions à analyser.

En général on s'évertue à choisir des étalons de référence dont l'absorption est voisine de celle du mélange, si bien que les termes logarithmiques sont petits.

Si l'on peut réaliser un équilibre parfait, les termes $\log \frac{I_x}{I_m}$ et $\log \frac{I_y}{I_m}$ disparaissent, ce qui apporte une simplification considérable.

La résolution simultanée du système d'équations en c_x et c_y, conduit à des expressions relativement compliquées, qu'on peut simplifier en posant

$$\frac{a_y'}{a_x'} = Y' \qquad \frac{a_x''}{a_y''} = Y'' \qquad 1 - Y'Y'' = k.$$

Dans ces conditions, on a :

$$c_x = k\left[c_x^s + \frac{1}{a_x'}\log\left(\frac{I_x}{I_m}\right)' - Y'\left(c_y + \frac{1}{a_y''}\log\left(\frac{I_y}{I_m}\right)''\right)\right]$$
$$c_y = k\left[c_y^s + \frac{1}{a_y''}\log\left(\frac{I_y}{I_m}\right)'' - Y''\left(c_x^s + \frac{1}{a_x'}\log\left(\frac{I_x}{I_m}\right)'\right)\right].$$

Si l'équilibre est parfaitement réalisé entre la solution et chaque étalon, les termes logarithmiques s'annulent et il vient :

$$c_x = k(c_x^s - Y'c_y^s)$$
$$c_y = k(c_y - Y''c_x^s).$$

Le seul problème à résoudre est donc celui de la détermination des rapports

$$Y' = \frac{a_y'}{a_x'} \quad \text{et} \quad Y'' = \frac{a_x''}{a_y''}.$$

On a

$$\log \left(\frac{I_o}{I_x}\right)' = a'_x c_x$$

et

$$\log \left(\frac{I_o}{I_y}\right)' = a'_y c_y$$

d'où :

$$\log \left(\frac{I_x}{I_y}\right)' = a'_y c_y - a'_x c_x = \left(\frac{a'_y}{a'_x} \cdot c_y - 1\right) a'_x c_x.$$

Si l'on pose

$$\beta = \left(\frac{c_y}{c_x}\right)$$

$$\log \left(\frac{I_x}{I_y}\right)' = a'_x c_x (\beta Y' - 1).$$

En ajustant soigneusement la concentration d'un des composants, on peut obtenir

$$\left(\frac{I_x}{I_y}\right)' = 1,$$

d'où :

$$\beta Y' - 1 = 0$$

et :

$$Y' = \frac{1}{\beta} = \frac{c_x}{c_y}.$$

En pratique il est inutile de chercher à équilibrer exactement les deux intensités lumineuses. Il suffit pour une concentration c_y donnée, d'établir une série de valeurs des concentrations c_x et de déterminer $\frac{I_x}{I_y} = 1$ par interpolation.

Ainsi que nous le verrons plus loin en étudiant certains dosages particuliers, les données théoriques de Hiskey et de ses collaborateurs permettent dans un grand nombre de cas de résoudre avec élégance des problèmes analytiques difficiles.

D'autres chercheurs ont contribué à étudier le gain de précision apporté par cette méthode. On peut citer parmi eux, Gridgeman 1952 et Ringbom et Osterholm 1953.

Il semble pourtant qu'on ne puisse achever ces considérations théoriques sans procéder à l'analyse rapide d'un article de Reilley et Crawford (4) paru en 1955, qui généralise le principe des mesures différentielles.

B. — Théorie de Reilley et Crawford

Reilley et Crawford (1955) montrent que quatre types de mesures absorptiométriques sont possibles. Ils les définissent par un critère opérationnel consistant dans le réglage du spectrophotomètre.

Si R est la lecture effectuée sur l'appareil de mesure, sur une graduation de 0 à 100 en pourcentages de transmission, on peut avoir les quatre groupes de réglages résumés dans le tableau suivant.

Méthode	Facteurs du réglage	Lecture en % transmission	Lecture en densité optique	Dénomination
Méthode 1	Courant d'obscurité Solvant	0 100	∞ 0	Colométrie ordinaire
Méthode 2	Courant d'obscurité Étalon un peu plus dilué que la solution	0 100	∞ 0	Spectrophotométrie différentielle
Méthode 3	Étalon un peu plus concentré que la solution Solvant	0 100	∞ 0	Méthode des traces
Méthode 4	Étalon c_2 Étalon c_1 $c_1 < c_2$	0 100	∞ 0	Méthode générale

De ces quatre méthodes, seules les deux dernières sont proposées d'une façon originale par les auteurs.

Si l'on trace sur un graphique les courbes d'étalonnage de principe correspondant aux quatre méthodes, on obtient le schéma représenté par la figure 5.

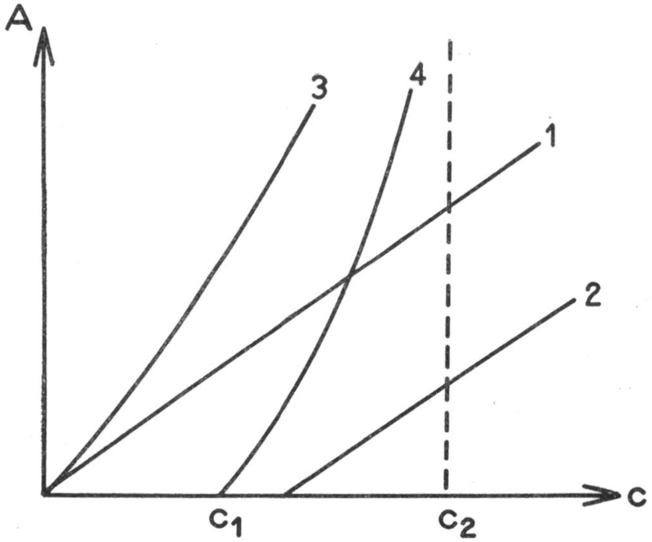


FIG. 5.

On voit que les méthodes 3 et 4 entraînent une déviation positive par rapport à la loi de BEER, d'où une augmentation de précision.

Il n'est pas possible, au sens strict du terme de considérer la méthode 3 comme une méthode différentielle, puisque le solvant est maintenu comme terme de référence. Néanmoins le principe fondamental en est voisin.

Par contre, la méthode 4 est une généralisation de la méthode différentielle. En effet, les deux limites extrêmes de lecture de l'appareil correspondent à deux éta-

lons différents. Ce n'est donc plus un dosage absolu, et il semble bien que ce soit là le moyen d'augmenter le plus possible la précision, par un étalement de l'échelle aux deux extrémités.

III. — CONSÉQUENCES EXPÉRIMENTALES

Quelle est l'attitude des expérimentateurs devant ces données théoriques ? Comme on peut s'y attendre, le gain de précision attendu d'après les calculs n'est effectif que si un assez grand nombre de précautions est pris.

Les considérations générales sur la pratique des dosages ne sont pas aussi clairement rassemblées que la théorie, en quelques articles importants. A ce stade, on commence en effet à atteindre les particularités de chaque détermination, et il n'est pas évident a priori qu'une précision donnée requiert autant de soins pour un dosage que pour un autre.

Quelques grandes lignes peuvent cependant être dégagées.

Il est certain que la précision d'un dosage ne peut être meilleure que celle avec laquelle les solutions de référence sont préparées. Ainsi, à moins que l'on ne dispose d'une méthode de dosage des solutions de référence plus précise que ne l'est la spectrophotométrie différentielle, ne doit-on préparer les étalons qu'avec des substances de pureté connue.

Ce qui est assez simple dans le cas du cuivre qu'on peut obtenir avec une pureté de 99,99 p. 100, le sera certainement moins dans le cas des terres rares par exemple.

Toutes les manipulations précédant les mesures doivent également être accomplies avec un très grand soin. Il est clair que l'utilisation purement volumétrique de verrerie jaugée ne doit se faire qu'après un étalonnage très précis. Dans certains cas, les prélèvements doivent être faits par pesée.

Un des points des plus difficiles est la qualité des cuves du spectrophotomètre. Les formules que nous avons rappelées ne sont valables que si le chemin optique dans deux cuves est rigoureusement le même, et que si ces cuves sont totalement dépourvues de défauts.

La seconde condition peut être assez facilement remplie. Il n'en est pas de même pour la première, et des corrections tenant compte des variations d'épaisseur du liquide traversé ont été proposées. La difficulté qu'il y a à se procurer quatre cuves suffisamment voisines, supprime pratiquement les possibilités qui sont offertes par les spectrophotomètres à quatre positions.

Le problème de l'état des cuves est tel que certains auteurs vont jusqu'à fournir des recettes de nettoyage (Young. Hiskey (1951) ou de polissage (Neal (1954).

On conçoit bien d'ailleurs qu'il s'agisse là d'un point d'autant plus critique que l'on travaille dans l'ultraviolet avec des substances dépourvues de coloration.

Enfin, il a toujours été supposé que le fonctionnement du spectrophotomètre était rigoureusement parfait. On devra tout particulièrement veiller au type de la réponse du photoélément (qui doit être linéairement proportionnelle à l'intensité lumineuse reçue) et à la stabilité des tensions d'alimentation (source et circuits amplificateurs). Ces facteurs qui, en principe, ne doivent pas être limitants si l'appareil est bien réglé, sont néanmoins très critiques puisque l'utilisation d'étalons fortement colorés oblige à utiliser les sensibilités électriques les plus grandes.

Finalement, en supposant que les conditions d'appareillage et de manipulations optima soient réunies, quatre principes généraux soulignés par BASTIAN, WEBERLING et PALILLA (1950) doivent être rappelés.

1° Si l'on veut éviter les déterminations un peu laborieuses de la concentration la plus appropriée de l'étalon de référence (méthode de HISKEY, recherche du maximum des produits *a'. c*), la courbe des absorptions en fonction des concentrations doit être linéaire sur chaque échelle de concentrations choisie.

2° Un incrément de concentration donné, doit correspondre à un incrément d'absorption constant. Ce point ne découle pas du 1°, puisque en choisissant des solutions à concentration croissante, on est conduit à élargir la fente et donc à modifier la répartition du flux lumineux.

3° L'échelle des absorptions doit être lue toujours au même point, afin de pouvoir comparer les précisions relatives.

4° La reproductibilité de la lecture de l'échelle des absorptions en un point donné doit être indépendante de la concentration du premier étalon de la gamme, c'est-à-dire de la largeur de la fente.

IV. — APPLICATIONS DE LA THÉORIE

A. — EXEMPLES DÉTAILLÉS

1° *Cuivre : Loi de* BEER *suivie*

Une des premières applications de la spectrophotométrie différentielle a été publiée par BASTIAN (1949) qui décrit le dosage du cuivre dans des alliages à forte teneur en ce métal. BASTIAN mesure l'absorption du perchlorate de cuivre dans l'acide perchlorique.

Il rappelle simplement qu'en supposant que la loi de BEER s'applique à toutes les concentrations, une différence d'absorption correspondant à 0,2 g Cu/100 ml peut être lue à 1 p. 100 près. Donc, si l'on dose une quantité de cuivre correspondant à 2 g/100 ml en comparaison avec un étalon à 1,8 g/100 ml. la différence des lectures est connue à 1 p. 100 près, si bien que la concentration totale de 2 g/100 ml est connue à 0,1 p. 100 près.

Si l'on réalise un étalon à 1,98 g/100 ml, la précision est de 0,01 p. 100.

On citera, de l'article de BASTIAN les résultats analytiques qui concernent deux échantillons différents :

— analyse d'un bronze au phosphore.
Cu présent : 77, 96 p. 100
Cu dose : 78, 30 p. 100 77, 88 p. 100, 78,08 p. 100, 77,85 p. 100
Moyenne : 78,03 p. 100 ± 0,21
Erreur : + 0,9 pour mille
analyse d'un laiton.
Cu présent : 61,26 p. 100 (dosé par électrolyse)
Cu dosé : 61, 50 p. 100 61,30 p. 100 61,38 p. 100 61,50 p. 100
Moyenne : 61,42 p. 100 ± 0,13
Erreur : + 2,6 p. 1 000.

Ce dosage du cuivre peut être pris comme un dosage type effectué par spectrophotométrie différentielle, dans des conditions simples où la loi de BEER est suivie et où il n'y a pas d'interférences.

2° *Anthracène : Loi de* BEER *non suivie*

Un exemple un peu plus complexe est fourni par HISKEY (1951) pour le choix de la concentration de référence optima quand la loi de BEER n'est plus suivie.

L'auteur étudie dans ce but l'absorption, dans l'ultraviolet, de l'anthracène dissous dans le benzène. On constate que la largeur de la bande passante est toujours relativement grande ; il y a donc une déviation par rapport à la loi de BEER.

Pour déterminer la valeur maximum du produit $a'c$, HISKEY prépare une série d'étalons de 2,5 en 2,5 mg/l. Le zéro d'absorption est tout d'abord obtenu avec le solvant, et la courbe d'étalonnage comprend les points 0 — 2,5 — 5 — 7,5 — 10 mg/1. On prend ensuite l'étalon 10 mg/l comme référence et on établit la courbe pour 10 — 12,5 — 15 — 17,5 — 20 mg/l. On procède de la même manière pour les autres concentrations.

Le graphique des absorptions en fonction des concentrations permet de calculer un coefficient d'extinction pour chaque étalon de référence donné (fig. 6).

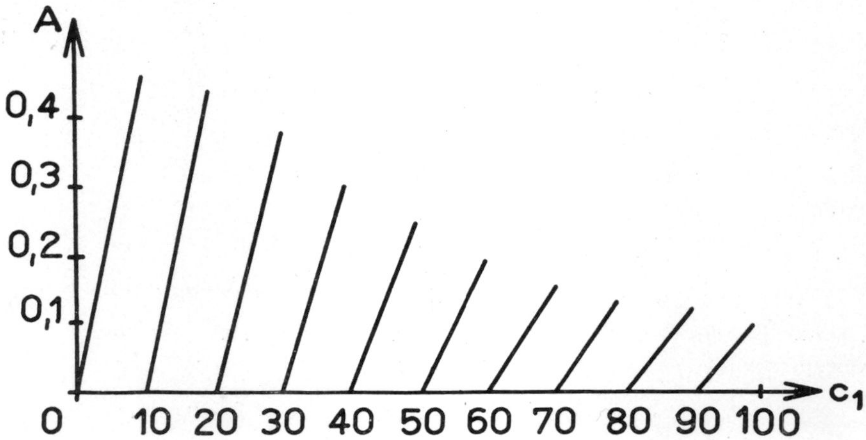


FIG. 6.

On constate que la valeur maxima du produit $a'c$ est obtenue pour c = 40 mg/l.

Avec le même système, HISKEY recherche également le maximum de $a'c$, par la méthode des largeurs de fente. On trouve dans ce cas, une concentration optima comprise entre 40 et 50 mg/l.

3° *Manganèse-Chrome : deux composants en mélange*

Nous étudierons comme troisième exemple une publication concernant le cas d'un mélange de deux constituants. Nous nous rapporterons à HISKEY (1952) qui après avoir choisi comme modèles les dosages de Mn et Cr, les applique à l'analyse d'aciers spéciaux.

Les déterminations du rapport des coefficients d'extinction aux deux longueurs d'onde donnent les résultats suivants :

$$\text{pour Mn, à 546 m}\mu \ \frac{a\,MnO_4K}{a\,Cr_2O_7K_2} = 0{,}4859 \pm 0{,}0005$$

$$\text{pour Cr, à 450 m}\mu \ \frac{a\,Cr_2O_7K_2}{a\,MnO_4K} = 0{,}00342 \pm 0{,}00009.$$

HISKEY compare alors les valeurs obtenues par la méthode absolue et la méthode différentielle. Le tableau suivant rappelle quelques-uns de ses chiffres.

Analyse du chrome.

Échantillon	Cr référence (Analyse NBS)	Cr dosé méthode absolue	% différence	Cr dosé méthode relative	% différence
—	—	—	—	—	—
72 *c*	0,967	1,008	4,2	0,974	0,72
72 *d*	1,03	1,05	1,9	1,04	0,97
135	5,15	5,26	2,1	5,20	0,97

Analyse du manganèse.

Échantillon	Mn référence (analyse NBS)	Mn dosé méthode absolue	% différence	Mn dosé méthode relative	% différence
—	—	—	—	—	—
72 *c*	0,539	0,530	1,7	0,537	0,37
72 *d*	0,537	0,517	3,7	0,537	0,00
135	0,458	0,440	3,9	0,460	0,44

4° *Néodyme : méthode de* REILLEY *et* CRAWFORD

Le quatrième et dernier exemple sera pris dans une publication de BANKS SPOONER et O'LAUGHLIN (1956), consacrée au dosage du néodyme en présence d'yttrium par la « méthode générale » (méthode 4) de REILLEY et CRAWFORD.

Soit c_1 la concentration donnant 100 p. 100 T et c_2 celle qui fournit 0 p. 100 T. On choisit c_1 et de c_1 telle façon que $\frac{c_1 + c_2}{2}$ donne une densité optique voisine de 0,43. Soit I_0 l'intensité incidente sur les cuves. On a respectivement pour la solution de concentration c, et les deux étalons c_1 et c_2, les relations :

$$I = I_0 \cdot 10^{-abc} \qquad I_1 = I_0 \cdot 10^{-abc_1} \qquad I_2 = I_0 \cdot 10^{-abc_2}.$$

Si R est la lecture sur l'échelle en pourcentage de transmission, on a :

$$I = \frac{I_1 - I_2}{100} R + I_2.$$

Il est intéressant de noter dans cet article l'introduction de termes correctifs dus aux différences de chemin optique dans les cuves.

Les dosages consistent à colorimétrer le perchlorate de néodyme en présence d'yttrium. Les essais portant sur des solutions synthétiques sont particulièrement bons, ainsi qu'en témoigne le tableau suivant :

Y_2O_3 ajouté	Nd_2O_3 ajouté	Nd_2O_3 dosé	% erreur
—	—	—	—
0,528 9	1,011 3	1,014 2	0,2 9
1,045 5	1,019 6	1,020 3	0,0 7
1,996 3	1,003 0	1,006 2	0,3 2

B. — Synopsis des dosages

On achèvera cet exposé sur la spectrophotométrie différentielle, en citant les travaux d'un certain nombre d'auteurs qui ont mis en œuvre cette technique.

Dans ce but on se contentera d'établir une liste dans laquelle les conditions de chaque dosage sont rappelées. Il nous a paru en effet inutile d'analyser dans le détail chaque publication, aucune idée nouvelle sur le principe de la méthode n'étant mise en relief.

Nous classerons les différentes références par ordre chronologique de publication. Nous donnerons successivement comme indications : l'année — le nom de l'auteur — la nature de l'élément dosé — la nature de la réaction colorée — les caractéristiques du dosage — éventuellement les grandes lignes des commentaires faits par l'auteur.

Année 1949.

— Bastian. Cuivre. Coloration du perchlorate dans ClO_4H — $\lambda = 870$ mμ. Étalons de 1,5 à 1,8 g Cu/100 ml. Précision 1 à 2 p. 1 000.

Année 1950.

— Bastian, Wederling, Pallila. Manganèse et chrome. Colorations du permanganate et du bichromate.

$\lambda = 546$ mμ (Mn) $\lambda = 450$ mμ (Cr). Cas du dosage de deux composants en mélange. Erreur < 1 p. 1 000.

Année 1951.

— Bastian. Nickel. Coloration du perchlorate $\lambda = 510$ mμ. Étalon à 0,7 g Ni/100 ml. Précision : $\pm$ 0, 5 p. 1000.

Young, Hiskey. Mn. Coloration du permanganate $\lambda = 526$ mμ. Étalons 4,96 à 5,88 mg Mn/100 ml. Précision : 1 p. 1 000.

Année 1953.

— Gee, Deitz. Phosphore. Complexe jaune vanado-molybdique $\lambda = 390$ mμ. Étalons de densité optique absolue voisine de 2. Précision $\pm$ 6 p. 1 000. Dosages sur roches phosphatées. Discussion de la stabilité du complexe.

Année 1954,

— Milner, Mc Phennah. Titane. Complexe jaune Ti-H_2O_2 dans SO_4H_2 2,5 N. $\lambda = 410$ mμ. Erreur : 1 p. 1 000. Dosages dans les alliages Ti-V. Utilisation conjointe d'un Beckman D. U. et d'un absorptiomètre Spekker 4.760.

— Neal (11). Titane. Complexe jaune Ti-H_2O_2 $\lambda = 410$ mμ. Erreur : 0,3 p. 1 000

Année 1955.

— Freeland, Fritz. Vanadium. Complexe V-H_2O_2 $\lambda = 460$ mμ. Erreur 1,1 p. 1 000. Discussion des corrections de cuve.

— Manning, White. Zirconium. Coloration rouge du complexe Zr — alizarine sulfonate de Na dans ClO_4H. $\lambda = 530$ mμ. Étalons de 1 à 1,5 mg Zr/25 ml. Erreur < 1 p. 100.

Année 1956.

— Silverman, Moudy. Uranium. Coloration du perchlorate. $\lambda = 415$-420 mμ. Étalon 0,8 g U/25 ml. Discussion de la validité de la loi de Beer en fonction des quantités de ClO_4H.

— BACON, MILNER. Uranium. Coloration du sulfate d'uranyle. $\lambda = 430$ mμ. Erreur < 0,4 p. 1 000.

— BANKS, SPOONER, O'LAUGHLIN. Néodyme. Coloration du perchlorate. $\lambda = 575$ mμ. « Méthode générale » de REILLEY et CRAWFORD. Erreur 2 p. 1 000.

— SUSANO, MENIS, TALBOTT. Uranium. Coloration du sulfate d'uranyle $\lambda = 418$ mμ. Détermination de la concentration optima de l'étalon de référence (20 mg U/ml) par la méthode des *a'c* maxima de HISKEY. Erreur moyenne : 3 p. 1 000.

— LOTHE. Fluor. Réaction du thorium rouge d'alizarine S avec les fluorures $\lambda = 525$ mμ. talons : 50 à 200 γ F^-/50 ml. Erreur < 1 p. 100.

— WHITE, MEYER, MANNING. Beryllium. Colorimétrie de la laque obtenue avec le p. nitrobenzène azorcinol en solution alcaline $\lambda = 510$ mμ. Étalons : 1,1 à 1,6 mg Be/100 ml. Erreur < 1 p. 100.

Année 1957.

— BANKS, BURKE, O'LAUGHLIN, THOMPSON. Uranium et niobium. Coloration du sulfate d'uranyle à 420 mμ, coloration de l'acide perniobique à 360 mμ. Méthode des deux composants en mélange selon HISKEY. Erreur moyenne : 4 p. 1 000.

Année 1958.

— BANKS, SPOONER, O'LAUGHLIN. Praséodyme, Erbium, Samarium. Colorimétrie des perchlorates : $\lambda = 444$ mμ (Pr). $\lambda = 379$ mμ (Er), $\lambda = 401$ mμ (Sm). Méthodes 3 et 4 de REILLEY et CRAWFORD. Précision : 0,17 p. 100 pour la méthode 4, 1,25 p. 100 pour la méthode 3.

— FREUND, HOLBROOK. Zirconium. Complexe rouge Zr — alizarine, sulfonate de Na $\lambda = 530$ mμ. Dosage en présence de Hafnium. Méthode des *a'c* maximum. Précision égale à celle des dosages gravimétriques.

— DE CARVALHO. Titane. Complexe jaune Ti-H_2O_2. $\lambda = 425$ mμ. Méthode 4 de REILLEY et CRAWFORD. Précision : 0,7 p. 1 000.

Année 1959.

— BAILEY, BOLTZ. H_2O_2. Colorimétrie du complexe Fe^{II}-phénantroline en présence de H_2O_2. $\lambda = 415$ mμ. Réactifs : 1,10 phénantroline pour 0,1 à 2,5 ppm de H_2O_2 ; 4,7 diphényl. 1,10 phénantroline (bathophénantroline) pour 0,03 à 0,1 ppm de H_2O_2.

V. — CONCLUSION

Il semble bien que le terme de spectrophotométrie différentielle soit à réserver à la technique que nous avons décrite. On ne peut cependant, pour éviter la confusion, passer sous silence une méthode appelée parfois spectrophotométrie différentielle, mais plus souvent, technique des spectres de différence.

Cette méthode est souvent utilisée par les biologistes pour étudier des réactions rapides, comme par exemple, les variations d'absorption de la lumière trouvées dans le cas de l'illumination d'organismes photosynthétiques. Dans ces conditions, la mesure est soit effectuée simultanément à deux longueurs d'onde différentes, soit effectuée à une longueur d'onde sur le produit illuminé et le produit non illuminé. Dans les deux cas, on enregistre le déséquilibre existant entre deux photoéléments.

Quoique ces procédés puissent être considérés comme différentiels, nous les avons cependant sciemment écartés de notre exposé, à la suite de l'unanimité qui semble être faite sur le sens de la terminologie spectrophotométrie différentielle.

Un autre type d'opération peut encore être considéré comme différentiel. C'est celui qui consiste à dériver par un procédé électrique approprié, le signal constitué par un pic d'absorption. L'introduction d'une capacité suffit en principe pour réaliser le montage. La figure 7 indique le schéma de la réponse. On conçoit qu'un tel dispositif puisse être très intéressant dans le cas où la courbe d'absorption présente des épaulements peu distincts qu'on veut mettre en relief. La figure 8 montre quel est alors le type de réponse auquel on peut s'attendre.

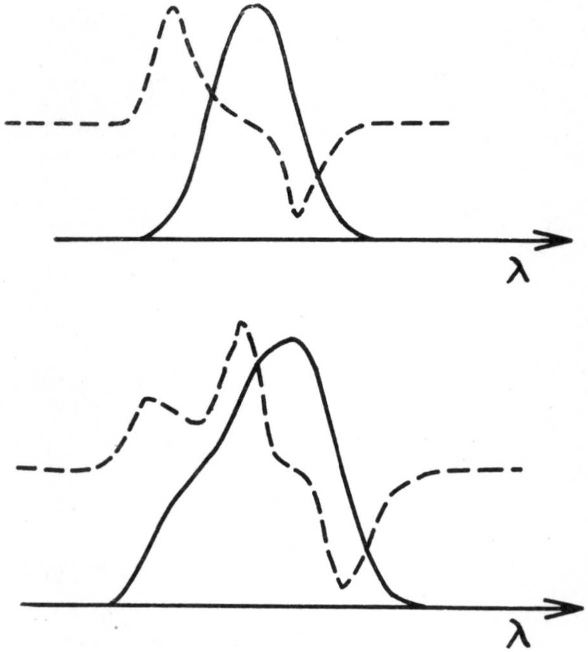


FIG. 7 et 8.

Nous n'avons pas trouvé dans la bibliographie de références sur ce point. Étant donné cependant que le procédé est utilisé dans les titrages potentiométriques, on peut penser qu'il est applicable.

On pourrait convenir de l'appeler spectrophotométrie dérivée.

Si l'on revient maintenant à la spectrophotométrie différentielle au sens strict, nous voyons qu'il s'agit essentiellement d'une méthode de dosage absorptiométrique de précision. Elle est en principe particulièrement bien adaptée aux cas des mesures faites sur des solutions fortement absorbantes. La « méthode générale » de REILLEY et CRAWFORD semble cependant pouvoir en étendre le champ d'application.

Il ne fait pas de doute que si l'on peut s'attendre à un gain de précision, on doit apporter aux manipulations un soin tout particulier. Aussi, peut-on se demander dans quelle mesure cette méthode est susceptible de supplanter la colorimétrie usuelle dans un service qui effectue des mesures en série.

Ce n'est toutefois pas là un argument qui lui est défavorable. Il est au contraire heureux de constater qu'un spectrophotomètre usuel a un potentiel de travail supérieur aux demandes courantes. L'analyste est assuré, de la sorte, d'avoir en sa possession, quand il le faut, une méthode de qualité qui permet de résoudre des problèmes difficiles.

Reçu pour publication en juillet 1961

SUMMARY

DIFFERENTIAL SPECTROPHOTOMETRY

The theoretical data on differential spectrophotometry show that the error in colorimetric measurements may substantially be reduced by using a coloured solution instead of a blank. Three main cases are investigated, relating to simple systems which follow BEER'S law and to more complicated systems in which one or two components either follow or do not follow BEER'S law.

Certain experimental consequences of these data are discussed, and a detailed study of some examples of the method's application in followed by a list of measurements indicating the possible uses of the method.

ZUSAMMENFASSUNG

DIFFERENTIAL SPEKTROPHOTOMETRIE

Die theoretischen Gegebenheiten welche sich auf die Differentialspektrophotometrie beziehen erlauben, durch Benutzüng einer gefärbten Lösung an Stelle einer Eichlösung O, die Fehlergrenze der kolorimetrischen Bestimmungen erheblicherweise zu verringern.

Es wurden drei der wichtigsten Fälle untersucht : einfache Systeme welche dem Beer'schen Gesetz obliegen, und kompliziertere Systeme mit ein bis zwei Komponenten welche dem Beer'schen Gesetz unterworfen sind oder nicht.

Aus diesen Gegebenheiten werden eine gewisse Anzahl experimenteller Folgerungen gezogen, und nach detaillierten Studien werden einige Beispiele zur Handhabung dieser Methode angegeben indem man eine Liste von Bestimmungen anführt die deren Anwendungsmöglichkeiten zeigt.

Теоритические данные дифференциальной спектро-фотометрии показывают что неточности колориметрических дозажей могут быть исправлены заменой белого раствора, раствором окрашенным.

В статье разсматриваются три главных случая : простые системы подчиняющиеся закону Беера и системы более сложные состоящие из одного или двух элементов подчиняющихся или не подчиняющихся этому закону.

Из полученных данных выведено некоторое количество экспериментальных заключений; и после детального изучения примеров практического применения этого метода приводится список дозажей указывающих его возможности.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.

AYRES H., 1949. Evoluation of accuracy in photometrie analysie. *An. Chem.*, **21**, 652-657.

BACON A. et coll., 1956. The determination of uranium by high precision spectrophotometry. *Analyst.*, **81**, 456-468.

BAILEY R. et coll., 1959. Differential spectrophotometrie Determination of hydrogen peroxyde. *An. Chem.*, **31**, 117-119.

BANKS V. V. et coll., 1957. Differential spectrophotometrie determination of uranium and niobium. *An. Chem.*, **29**, 995-998.
BANKS C. V. et coll., 1958. Differential spectrophotometrie determination of rare earths. *An. Chem.*, **30**, 458-462.
BANKS C. V. et coll., 1956. Differential spectrophotometrie determination of neodynium yttrium mixtures. *An. Chem.*, **25**, 1894-1897.
BASTIAN R., 1949. Determination of high percentage of copper. *An. Chem.*, **21**, 972-974.
BASTIAN R., 1951. Differential spectrophotometrie determination of high percentage of nickel. *An. Chem.*, **23**, 580-586.
BASTIAN R., et coll., 1950. Differential analysis with a Beckman spectrophotometer. *An. Chem.*, **22**, 160-166.
CHANCE B., 1953. The carbon monoxyde compound of the cytochrome oxydases, *J. Biol. Chem.*, **202**, 397-406.
CHANCE B., 1954. Spectriophotometry of intracellular respiratory pigments. *Science*, **120** 767-775.
CHANCE B. et coll., 1953. New methods for the study of the carbon monoxyde composent of respiratory enzymes. *Biophys. Biochem. Acta.*, **12**, 289-298.
DE CARVALHO R. A. G., 1958. Determination of titanium in presence of niobium by differential spectrophotometry. *An. Chem.*, **30**, 1124-1127.
FREELAND M. Q. et coll., 1955. High precision spectrophotometrie microanalysis with application to vanadium. aluminium elloys. *An. Chem.*, **27**, 1737-1741.
FREUND H., 1958. Differential spectrophotometric determination of zirconium in presence of hafnium. *An. Chem.*, **30**, 462-465.
GEE A., DEITZ V. R., 1953. Determination of phosphates by differential spectrophotometry. *An. Chem.*, **25**, 1329-1324.
GRIDGEMAN N. T., 1952. Reliability of photoelectric photometry. *An. Chem.*, **24**, 445-449.
HISKEY C. F., 1949. Principles of precision colorimetry. *An. Chem.*, **21**, 1440-1446.
HISKEY C. F., FIRESTONE D. 1952. Precision colorimetry. *An. Chem.*, **24**, 342-347.
HISKEY C. F. et coll., 1950. Principles of precision colorimetry. *An. Chem.*, **22**, 1464-1470.
HISKEY C. F., YOUNG I. G., 1951. Principles of precision colorimetry. *An. Chem.*, **23**, 1196-1201.
LOTHE J. J., 1956. Differential spectrophotometric determination of fluoride. *An. Chem.*, **28**, 949-953.
MANNING D. L. et coll., 1055. Differential determination of zirconium. *An. Chem.*, **27**, 1389-1392.
MILNER G. W. C. et coll., 1954. The determination of titanium in uranium-titanium alloys by differential absorptiometry. *Analyst*, **79**, 414-424.
NEAL W. T. L., 1954. The determination of titanium by high precision absorptiometry. *Analyst*, **79**, 403-413
REILLEY C. N., CRAWFORD C. M., 1955. Principles of precision colorimetry. *An. Chem.*, **21**, 716-725.
RINGBOM A., OSTERHOLM K., 1953. Differential methods for precision analysis. *An. Chem.*, **25**, 1798-1803.
SILVERMAN L. et coll., 1956. Colorimetric determination of moderate concentrations of uranium in perchloric acid solutions. *An. Chem.*, **28**, 45-47.
SUSANO C. D. et coll., 1956. Differential spectrophotometric method for determination of uranium. *An. Chem.*, **28**, 1072-1075.
WHITE J. C. et coll., 1956. Differential spectrophotometric determination of beryllium. *An. Chem.*, **28**, 956-959.
YOUNG I. G., HISKEY C. F., 1951. Precision colorimetry. *An. Chem.*, **23**, 506-508.

Le Directeur-Gérant : M. L. CAGNAC

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 30-12-1961

Dépôt légal : 4e trimestre 1961 N° d'impression : 176

Ann. agron., 1961, **12** (5), 473-488.

631. 411. 3 : 631. 416. 2.

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DES PHOSPHATES NATURELS DANS LES SOLS DE CRAIE

E. RADET

Station agronomique, Châlons-sur-Marne.

SOMMAIRE

Tous les travaux des Agronomes concordent pour reconnaître une certaine valeur fertilisante aux phosphates naturels et, pour affirmer que leur utilisation directe doit être réservée à une certaine catégorie de sols riches en matière organique, à réaction acide.

Dans tous les autres sols minéraux, privés de calcaire, à réaction acide, leur action loin d'être négligeable resterait inférieure à celle constatée avec les formes classiques. Cependant à la lumière de recherches récentes, il apparaîtrait que dans de tels sols, initialement bien pourvus en acide phosphorique les engrais phosphatés peu solubles et lentement dissociables seraient préférables aux formes solubles à effet rapide.

Il est également reconnu que la présence du calcaire exerce une influence prépondérante sur l'efficacité des engrais phosphatés, et cette action se manifeste avec une plus grande intensité dans les sols renfermant une proportion notable de carbonate de chaux actif, facilement soluble dans l'eau chargée d'acide carbonique.

Cependant, il a été avancé que même dans les sols calcaires, à condition de recourir aux phosphates naturels tendres finement moulus, en les associant à des matières organiques d'origine végétale comme le fumier et les engrais-verts, il deviendrait possible d'obtenir un effet fertilisant équivalent et comparable aux formes classiques.

En présence de cette assertion, nettement en contradiction avec les connaissances actuelles, il n'était pas inutile d'apporter des preuves expérimentales incontestables en vue de la vérifier ou éventuellement de la réfuter, en procédant à des expériences de laboratoire et aù champ.

De plus actuellement les phosphates naturels de formation et d'origine très différentes, tantôt amorphes ou cristallisés, sont classés d'après leur degré de dureté. Cette méthode d'appréciation trop imprécise a motivé le souci d'une mise au point, en reprenant l'étude des réactifs chimiques déjà proposés par divers auteurs français pour différencier les phosphates naturels.

Les expériences de laboratoire se proposaient de suivre le comportement pendant deux ans des phosphates naturels tendres, du type Gafsa, finement moulus, privés ou associés à un engrais-vert, dans un sol très calcaire dérivant de la craie, en utilisant comme réactif d'extraction le citrate de soude.

Parallèlement un champ d'expérience a été institué sur sol calcaire de défriche de pins, riche en matière organique, mais carencé en acide phosphorique, avec les phosphates naturels tendres de Gafsa, finement moulus, en vue de suivre leur effet fertilisant, par comparaison avec le superphosphate ordinaire et les scories sur deux années successives.

L'ensemble de ces résultats, portant sur deux années, permet de porter un jugement sur la valeur agricole des phosphates naturels dans les sols très calcaires de la Champagne. Ils ont confirmé aussi la nette supériorité des engrais phosphatés solubles, comme le superphosphate, sur les scories dans les sols de craie déficients en cet élément.

I. — INTRODUCTION

Les engrais phosphatés sont classés d'après leur solubilité au point de vue commercial.

L'expression P_2O_5 soluble eau, citrate d'ammoniaque, acide citrique 2 p. 100, qui s'applique au super, phosphate d'ammoniaque, phosphate bicalcique, phospal et scories, permet de les différencier, mais ne fournit aucune indication sur leur valeur fertilisante.

Dans les phosphates naturels le P_2O_5 est soluble en totalité dans les acides minéraux, partiellement ou en totalité dans certains acides organiques suivant leur concentration. Leur effet sur les végétaux varie suivant l'origine géologique et le mode de formation. Ce comportement très différent de leur valeur fertilisante provient bien plus de la diversité de leur structure que de leur composition élémentaire qui demeure souvent très voisine.

Les travaux de F. CARBONA (1956) sur la texture physique des phosphates naturels de chaux révèlent des différences appréciables de porosité et de surface spécifique entre les phosphates d'origine et de formation différentes.

BARBIER et ses collaborateurs (1944 et 1948) ont montré que dans les sols calcaires la formation de composés apatitiques ne fait aucun doute, mais dans les autres sols d'autres causes interviennent dans la rétrogradation du P_2O_5 avec possibilité de régénération vers la forme soluble primitive. Ils ont précisé que la totalité des phosphates solubles incorporés dans un limon demeure, après dix ans, mobilisable plus ou moins vite par les végétaux.

BOISCHOT et ses élèves (1949) ont indiqué que la fixation de P_2O_5 sur les sables calcaires de la terre arable a lieu par adsorption lorsque la concentration est faible. Si cette concentration est forte, comme cela peut se produire autour de particules d'engrais, il y a précipitation, mais les précipités se redissolvent, du moins partiellement, dans les solutions du sol et leur P_2O_5 se fixe par adsorption sur le calcaire Cet élément ainsi fixé peut repasser en solution, par le phénomène inverse de désorption, pour être mis à la disposition des plantes.

Dans les sols de craie une fraction de l'ordre de 15 à 20 p. 100 du P_2O_5 soluble du super peut se convertir en phosphates cristallins apatitiques irréversibles au bout de trois ans de vieillissement RADET (1957).

Dans une première note sur les phosphates hyposolubles RADET (1958) il a éte établi qu'après sept mois en sols de craie une partie de P_2O_5 soluble du phosphate bicalcique, ou passée sous une forme utilisable par les végétaux avec le phospal et les scories, rétrograde progressivement vers des formes insolubles, et partiellement réversibles.

Certains chercheurs, en particulier G. BARBIER, considèrent que les phosphates lentement solubles, progressivement dissociables, apparaîtraient préférables aux formes solubles en totalité, tout au moins dans certains sols.

Cette hypothèse, en partie vérifiée par ces auteurs, se révèle également exacte pour les sols de craie avec les scories et le phospal, mais peut-elle être étendue aux phosphates naturels dans ces mêmes sols ?

L'objet de ce travail est :

1° d'établir une classification des phosphates naturels tenant compte de leur nature pétrographique.

2° de déterminer par des recherches de laboratoire et des expériences au champ la valeur fertilisante des phosphates naturels.

II. — ÉTUDE ANALYTIQUE

1° Différenciation des phosphates naturels par les réactifs chimiques

Les expressions de phosphates naturels durs et tendres sont employées pour les différencier. Ainsi les phosphates algériens et tunisiens rentrent dans la catégorie des phosphates tendres, les phosphates marocains dans les demi-durs et les phosphates de Kola dans les durs.

Cette appréciation suggestive s'avère nettement insuffisante sur le plan de leur commercialisation, car il existe toute une gamme intermédiaire de phosphates à côté de ces catégories très caractéristiques.

Divers chercheurs se sont préoccupés des possibilités de différenciation par les méthodes chimiques. A cet égard, il convient de citer les travaux de Gesiger et Pulver (1953) sur la solubilité des phosphates naturels tendres et durs dans divers acides organiques en solution diluée.

Cette étude a été reprise, en ayant recours aux acides organiques préconisés par ces auteurs et un autre solvant : le réactif carbonique.

Les phosphates naturels examinés d'origine et de dureté différentes ont été amenés au même degré de finesse (tamis 300), sauf avec les scories prises comme références.

Solubilité dans les acides organiques

Le mode opératoire consiste à agiter pendant 30 minutes, 5 grammes de phosphate avec 500 cc des acides organiques, formique, malique et citrique à la concentration de 2 p. 100 .

Les résultats obtenus figurent dans le tableau.

	Acide citrique		Acide malique		Acide formique	
	Fraction extraite %	P_2O_5 extrait %	Fraction extraite %	P_2O_5 extrait %	Fraction extraite %	P_2O_5 extrait %
Scories	15,70	84,4	15,30	82,2	14,38	77,3
Gafsa	11,06	40,8	12,82	47,3	21,10	77,9
Kalaa Djerda	6,79	26,3	7,91	30,6	13,82	53,6
Floride	6,38	18,6	6,34	18,4	7,20	20,9
Kola	2,96	7,6	2,34	6,0	3,08	7,9

Les phosphates naturels se comportent différemment suivant le réactif employé.

Avec les acides citrique et malique, l'attaque est modérée et sensiblement identique, elle met nettement en évidence la structure et la dureté du minerai. Ces sol-

vants différencient les scories, qui présentent une solubilité plus grande, et malgré une ténuité moindre, des phosphates naturels.

L'acide formique agit plus énergiquement sur les phosphates tendres, ainsi il attribue une solubilité, sinon égale tout au moins très voisine à celle des scories, mais les différences entre les phosphates naturels sont, suivant leur origine, beaucoup plus accusées.

En définitive, il est possible, à l'aide de ces réactifs acides, de classer les phosphates naturels en fonction de leur structure pétrographique.

Solubilité dans l'eau chargée d'acide carbonique

Des prises d'essai de scories et de phosphates naturels (tamis 300) correspondant à 10, 20 et 30 mg de P_2O_5 ont été placées au contact de 500 cc de réactif carbonique et maintenues à l'agitation pendant 2 heures.

Les résultats sont consignés dans le tableau.

	P_2O_5 solubilisé en mg			Pourcentage P_2O_5 extrait		
	10	20	30	10	20	30
Scories	4,75	6,78	10,27	47,5	33,9	34,2
Scories (tamis 300...	6,80	11,40	15,60	68	57	52
Gafsa..............	8,14	14,84	15,50	81,4	74,2	51,8
Kaala Djerda.......	6,70	9,41	10,91	67,5	47	36,3
Floride	5,0	6,55	7,66	50	32,7	25,5
Kola	0,8	0,86	0,99	8	4,3	3,3

Les valeurs obtenues indiquent un ordre de grandeur qui peut varier avec la concentration de la solution aqueuse en acide carbonique.

La solubilité carbonique des phosphates naturels et des scories augmente avec les doses, mais il n'existe pas de proportionnalité avec celles-ci. Très importante avec le phosphate de Gafsa et supérieure, sinon égale, aux scories amenées au même degré de finesse, elle diminue avec les autres phosphates suivant leur origine.

Le classement des phosphates naturels s'opère dans le même ordre que celui obtenu avec les acides organiques.

Le coefficient de solubilisation des phosphates de Gafsa dans le réactif carbonique, très voisin, sinon supérieur à finesse égale à celui des scories, suivant les concentrations, n'implique pas cependant une même valeur fertilisante, laquelle demeure sous la dépendance de la nature des sols.

Dans les sols à réaction acide, dans les sols tourbeux ou humifères peu ou pas calcaires, l'efficacité des phosphates naturels ne saurait être mise en doute, encore que leur comportement soit subordonné à leur origine, car dans de tels sols, la dégradation de la matière organique fournit des quantités importantes de CO_2.

Conclusions

Les variations observées dans la solubilisation des phosphates naturels par les solutions diluées d'acides organiques et le réactif carbonique montrent l'existence d'espèces chimiques, minéralogiques et pétrographiques très différentes.

La solubilité relative des phosphates tendres et Gafsa ou déjà durs de Kalaa Djerda dans l'acide formique est nettement supérieure à celle obtenue dans l'acide citrique, l'acide malique ; par contre, la solubilité dans ces mêmes réactifs se modifie très peu avec les phosphates durs de Floride et de Kola.

L'acide formique apparaît plus sélectif, les écarts qui séparent les solubilités des phosphates examinés étant de plus larges amplitudes, ce solvant mérite d'être retenu pour les différencier, de préférence à l'acide citrique et à l'acide malique, dont l'action solubilisante très voisine se révèle plus imprécise et très rapprochée dans la série des phosphates demi-durs à durs.

La solubilité dans le réactif carbonique constitue un critère intéressant, car elle se rapproche des moyens d'action des solutions qui circulent dans le sol, plus ou moins enrichies en acide carbonique ; mais cette réaction pour se manifester utilement exige des sols privés de calcaire et bien pourvus en matière organique. Avec un réactif carbonique partiellement saturé en bicarbonate de calcium la dissolution est nulle.

Le classement des phosphates naturels avec la solution carbonique s'opère dans le même sens que celui obtenu avec l'acide formique, encore que ce réactif confère une solubilité plus élevée au phosphate de Floride, et faible, mais de même ordre de grandeur avec le phosphate très dur de Kola.

En résumé, le réactif à l'acide formique, en solution diluée à 2 p. 100, de même le réactif carbonique sont particulièrement recommandables pour le classement des phosphates naturels, en raison de leur plus grande sensibilité. Toutefois le titre de la solution carbonique étant fonction de la température, la dissolution de l'aide phosphorique peut présenter des variations assez grandes et les résultats obtenus par des laboratoires différents risquent de ne pas être comparables ; cet inconvénient n'existe pas avec l'acide formique.

Cette mesure avec l'acide formique en solution diluée à 2 p. 100 doit être effectuée sur des produits amenés au même degré de finesse, en prenant comme référence le tamis n° 300, généralement adopté pour leur commercialisation. Ce test est destiné exclusivement à la différenciation des phosphates naturels, car tous les Agronomes sont d'accord pour affirmer l'absence de toute corrélation entre la solubilité des phosphates naturels dans les réactifs chimiques et leur effet fertilisant.

2° Evolution des phosphates naturels dans les sols calcaires au cours du vieillissement

D'après les divers auteurs qui se sont préoccupés des phosphates naturels, il a été reconnu que les possibilités de leur utilisation directe en agriculture se trouvent étroitement limitées à certaines catégories de sols bien déterminées et à certaines cultures.

Le phosphatage du fumier et des composts, ou le mélange à certains engrais minéraux ou organiques ne permettent pas non plus d'augmenter d'une manière appréciable l'efficacité des phosphates naturels.

Une augmentation des doses d'acide phosphorique à l'état de phosphates naturels ne se traduit pas, dans la majorité des situations, par un effet comparable à celui des autres engrais phosphatés usuels.

L'emploi des phosphates naturels se trouverait donc, dans l'état actuel de la question, strictement réservé aux terres bien pourvues en matière organique à réaction

acide ou voisine de la neutralité. C'est le cas des sols tourbeux, des défrichements de landes et de bruyères, sur sols non calcaires, ou encore de vieilles prairies, et probablement des sols minéraux non calcaires à pH inférieur à 7. Dans de tels sols ils donneront des résultats comparables et parfois supérieurs à ceux des autres engrais phosphatés.

Les phosphates terreux tendres seront choisis de préférence aux phosphates durs ou cristallins plus résistants à l'attaque des agents du sol. Ils doivent être finement moulus et appliqués longtemps à l'avance.

Les cultures de légumineuses, de crucifères, de sarrasin, les cultures maraîchères, les prairies permanentes sont capables d'en tirer un meilleur profit. Ils peuvent être employés comme fumure de fond aux plantations d'arbres.

D'après les connaissances acquises l'apport de phosphates naturels, amorphes, tendres, finement moulus comme ceux de Gafsa, doit être, à priori, contre-indiqué dans les sols calcaires ; mais il n'est pas exclu de se demander si, en présence de matière organique jeune en particulier d'un engrais-vert, à la faveur d'une activité plus intense des agents bio-chimiques, l'acide phosphorique insoluble ne se convertit pas sous des formes progressivement assimilables par les végétaux.

Le citrate de soude en solution aqueuse à 35 g par litre constitue à cet égard un très bon réactif d'extraction des diverses formes d'acide phosphorique. Des études antérieures (5 et 6) ont montré que celui-ci dissout en totalité le phosphate bicalcique, très faiblement le phosphate tricalcique, le phosphate d'alumine et les phosphates de fer.

Solubilité des phosphates naturels dans le citrate de soude

Des doses en acide phosphorique de l'ordre de 10-20 et 30 mg des phosphates naturels étudiés ont été placées au contact de 250 cc de la solution de citrate de soude à 35 g par litre et maintenues à l'agitation pendant 4 heures.

Les résultats obtenus figurent dans le tableau.

	P_2O_5 solubilisé en mg			Pourcentage P_2O_5 extrait		
	10	20	30	10	20	30
Gafsa	0,85	1,37	1,41	8,5	6,8	4,7
Kalaa Djerda	0,60	1,05	1,13	6	5,2	3,7
Floride	0,22	0,48	0,60	2,2	2,4	2
Kola	0,13	0,31	0,35	1,3	1,5	1,1

Le réactif solubilise faiblement le phosphate tricalcique. La fraction extraite varie avec la nature pétrographique, les phosphates tendres de Gafsa étant nettement plus solubles.

L'acide phosphorique dissout par le solvant est inversement proportionnel aux doses essayées.

Le classement des phosphates conserve le même ordre que celui obtenu avec les acides organiques et le réactif carbonique.

Le pouvoir dissolvant du citrate de soude sur le phosphate tricalcique étant très ménagé, il est possible de suivre avec ce réactif le comportement des phosphates naturels en sols de craie.

Comportement des phosphates naturels tendres de Gafsa dans les sols de craie

Cette expérience de laboratoire a été réalisée à partir d'une terre calcaire bien pourvue en éléments fertilisants, à 72 p. 100 de carbonate de chaux, 6,4 p. 100 argile, 4,1 p. 100 matière organique et pH 8,3.

Des prises d'essai de 25 g terre fine ont été additionnées de 22 mg de phosphate de Gafsa finement moulu (particules inférieures à 50 microns), soit 6 mg en P_2O_5.

D'autres prises ont reçu, en plus du phosphate, 500 mg d'engrais-vert composé de dactyle et de luzerne.

Ces additions rapportées à l'ha pour 2 500 t de terre correspondaient à 600 unités P_2O_5 et 50 t engrais-vert.

Après mélange intime du phosphate et de l'engrais-vert finement fragmenté, la terre humidifiée à 18 p. 100 à été placée dans des petits flacons hermétiquement bouchés au liège.

Dans les mêmes conditions ont été préparés des échantillons de terre témoin avec ou sans apport d'engrais-vert, mais privés de phosphate.

Des extractions successives avec le solvant au citrate de soude ont été faites après un mois de contact, puis ensuite à des intervalles réguliers pendant deux ans.

La méthode d'extraction consiste à ajouter 250 cc de réactif à la prise d'essai de 25 g de terre, à soumettre à l'agitation pendant 8 heures, avec un intervalle de repos de 18 heures après 4 heures d'agitation. Le solvant est séparé en totalité sur filtre à l'entonnoir de Büchner en s'aidant de la trompe à vide. Cette dernière opération terminée, il est procédé à deux nouvelles extractions dans les mêmes conditions.

Après concentration du filtrat et destruction de la matière organique, en opé-

	Sans engrais vert			Engrais vert 50 t/ha		
	1re extr.	2e extr.	3e extr.	1re extr.	2e extr.	3e extr.
Après un mois :						
Terre + P_2O_5	70	53	43	80	66	50
Témoin	69	51	41	82	64	50
P_2O_5 ajouté %	0,4	0,8	0,8	0	0,8	0
Après trois mois :						
Terre + P_2O_5	59	40	36	73	54	46
Témoin	56	36	36	71	51	40
P_2O_5 ajouté %	1,2	1,6	0	0,8	1,2	2,5
Après dix mois :						
Terre + P_2O_5	56	57	36	76	64	55
Témoin	54	47	36	73	58	55
P_2O_5 ajouté %	0,8	4,1	0	1,2	2,5	0
Après seize mois :						
Terre + P_2O_5	56	43	33	72	59	39
Témoin	55	32	34	69	54	32
P_2O_5 ajouté %	0,4	4,5	0	1,2	2	2,9
Après deux ans :						
Terre + P_2O_5	49	45	55	66	51	58
Témoin	48	42	54	64	48	50
P_2O_5 ajouté %	0,4	1,2	0,4	0,8	1,2	3,3

rant en milieu alcalin avec une solution concentrée de permanganate et addition d'acide nitrique, le P_2O_5 est dosé suivant la méthode de LORENZ.

Les résultats obtenus provenant de la moyenne des deux essais exprimés en mg pour mille grammes de terre fine sont inscrits dans le tableau.

La fraction de P_2O_5 cédée à la 1re extraction, en provenance des phosphates naturels, se révèle très faible et d'un ordre de grandeur voisin des erreurs expérimentales, avec ou sans addition d'engrais-vert, pendant le cours de deux années aux périodes examinées.

Dans les mêmes conditions, la fraction de P_2O_5 livrée au réactif à la 2e et à la 3e extraction, représentée en majorité par des phosphates calciques déjà moins assimilables, ne s'avère pas beaucoup plus importante.

En fait, les phosphates naturels finement moulus et tendres, comme ceux de Gafsa, ne subissent pas ou peu de modifications dans leur composition, et se maintiennent sous leur forme primitive avec addition ou en l'absence d'engrais-vert, au cours du vieillissement.

Pendant cette période, le processus de la rétrogradation qui intéresse les réserves initiales en P_2O_5 du sol, provenant des reliquats des fumures et de la minéralisation des résidus des récoltes, se caractérise par une diminution lente et régulière de la fraction initiale de P_2O_5 solubilisé au début de l'expérience.

Cette rétrogradation s'intensifie davantage en l'absence de l'engrais-vert.

A toutes les périodes examinées et pendant une durée de deux ans, la fraction de P_2O_5 passée dans le réactif en 1re extraction dans la terre témoin additionnée de l'engrais-vert se maintient toujours à un niveau nettement supérieur à celui de la terre témoin sans aucun apport.

L'engrais-vert, en se dégradant dans la terre sous l'action des microorganismes, favorise et stimule le travail bactérien, intensifie ainsi toutes les réactions bio-chimiques utiles à la mise en œuvre des réserves du sol, en libérant des éléments temporairement bloqués ou en les solubilisant.

Ces actions diverses, nettement mises en évidence avec l'acide phosphorique des réserves initiales du sol aboutissent à une reconversion partielle de cet élément en des formes plus vite mobilisables.

Cet effet très net de l'engrais-vert sur la régénération des réserves phosphatées d'un sol de craie n'est plus apparent avec les phosphates naturels.

Conclusions

Dans les conditions expérimentales, les phosphates naturels tendres comme ceux de Gafsa, finement moulus avec particules inférieures à 50 microns, privés ou associés à des matières organiques vertes et fraîches comme un engrais-vert, demeurent complètement inassimilables dans un sol de craie, même après deux années de vieillissement.

L'acide phosphorique préexistant dans le sol passe progressivement sous des formes plus difficilement assimilables. Cette rétrogradation s'accentue davantage dans les sols appauvris en matière organique.

Les engrais-verts enfouis agissent sur les réserves phosphatées du sol, dont une fraction, non négligeable, temporairement inutilisable, se trouve reconverti sous des formes rapidement mobilisables au cours du processus de la dégradation de l'engrais-vert.

III. — EXPÉRIMENTATION AU CHAMP

L'expérimentaiton aux champs, qui seule peut donner une réponse satisfaisante et incontestable à l'emploi des phosphates naturels en sol de craie, a été instituée sur sol de défriche de pins, carencé en P_2O_5. Les renseignements recueillis après deux années consécutives permettent déjà de formuler des conclusions très précises pour la période envisagée.

Nature du sol. — Ce sol de 30 cm d'épaisseur à 68 p. 100 de calcaire, qui dérive de la craie sous-jacente, est bien pourvu en azote avec 2.33 p. 1 000, en matière organique 6 p. 100 (méthode Anne), mais carencé en P_2O_5 avec 0.027 p. 1 000 (citrate de soude) et en K_2O échangeable avec 0.08 p. 1 000.

Antécédent. — Défriche de pins.

Cultures. — Betteraves sucrières. Blé.

Protocole expérimental.— Les phosphates naturels ont été mis en comparaison avec le super ordinaire et les scories. Les doses de P_2O_5 appliquées sur les cultures sont les suivantes :

	Betterave sucrière (1re année)	Blé (2e année)
	—	—
Phosphates naturels, scories, super....	90 kg	90 kg
— *id.*—	180 kg	60 kg
Phosphates naturels (hors série)	360 kg	90 kg

Avec le dispositif carrés latins adopté, chaque essai est répété 7 fois. La surface de chaque parcelle est de 9,20 m soit 184 m², avec une allée de 1,60 m pour la séparation de chaque parcelle et un intervalle de 10 m entre chaque bloc de 7 parcelles.

Betteraves sucrières

Fumure. — La fumure phosphatée sous les formes et aux doses précitées, la fumure potassique uniforme de l'ordre de 275 unités à l'état de chlorure, ont été incorporées au sol par des façons culturales appropriées, consécutives au labour de défoncement pour le défrichement, le 19 novembre 1958.

La fumure azotée à la dose de 175 unités a été fractionnée, avec apport de 125 unités à l'état d'ammonitrate aux façons culturales avant le semis, début mars, puis de 50 unités à l'état de nitrate de soude du Chili au démariage le 15 mai.

Il a été adjoint 30 kg de boracine à 13,8 p. 100 de bore avant le semis, avec l'ammonitrate.

Variété et semis. — Polyploïdes Tourneur. Semis le 18 mars à la dose de 20 kg/ha, en lignes espacées de 45 cm.

Observations culturales. — Les conditions très satisfaisantes d'humectation du sol pendant la période de la formation du bouquet foliaire jusqu'en juillet ont assuré une croissance normale des betteraves ayant reçu du super et les scories, avec apparemment une plus belle végétation pour le super.

Pendant cette même période, le développement des betteraves a été très ralenti avec les phosphates, quelles que soient les doses appliquées. L'opération du démariage n'a pas pu être pratiquée.

Les précipitations atmosphériques au cours de la période de grossissement de la betterave, de juillet à octobre, ont été déficitaires d'environ 50 p. 100 sur le régime moyen. De plus, le temps sec et chaud qui a régné au cours de cette période et s'est aggravé en septembre avec 0,7 mm d'eau, a provoqué un arrêt total de la croissance des betteraves avec super et scories, avec destruction de l'appareil foliacé vers la mi-août en raison de l'épuisement des réserves en eau du sol et de l'impossibilité au système radiculaire d'atteindre la roche crayeuse humide dans ce sol profondément retourné par le défrichement des pins.

Au contraire, avec les phosphates naturels, la carence en P_2O_5 ayant réduit très fortement le développement de la betterave, celle-ci a pu couvrir ses besoins en eau et poursuivre son évolution jusqu'à la récolte.

Récolte. — Les betteraves ont été arrachées début novembre. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau.

	Racines en kg/h	Densité
Phosphates naturels		
90 unités P_2O_5	11 430 + 282	7°8
180 —	14 700 ± 1 250	8°
360 —	16 300 ± 1 760	7°5
Scories 18 %		
90 unités P_2O_5	26 100 ± 1 730	7°8
180 —	25 940 ± 1 550	7°6
Super 18 %		
90 unités P_2O_5	30 290 ± 755	7°9
180 —	34 150 ± 823	7°5

L'analyse statistique montre que seuls les traitements avec super 18 p. 100 et les phosphates naturels avec 90 unités sont significatifs.

Les écarts enregistrés entre les diverses formes d'engrais phosphatés sont suffisamment importants et d'un tel ordre de grandeur que l'on peut considérer cette expérience comme valable.

En première année d'application, les phosphates naturels tendres, dans les sols de craie très alcalins, même très bien pourvus en matière organique, participent peu ou pas, même à très fortes doses, à l'alimentation phosphorée des végétaux.

Cette expérience confirme de nouveau que dans les sols de craie carencés en P_2O_5, en particulier pour les sols de défriche de pins, le recours aux engrais phosphatés solubles comme le super, s'avère incontestablement plus avantageux et plus rentable. De telles formes marquent également une très nette supériorité sur les phosphates hyposolubles comme les scories, moins rapidement utilisables.

La teneur en sucre, anormalement faible pour une année très ensoleillée, résulte du retard de la végétation des betteraves avec les phosphates naturels consécutif à la carence en P_2O_5 et à la chute prématurée des feuilles avec le super et les scories due à l'épuisement des réserves en eau du sol.

Blé. Variété Later — 160 kg/ha — Ecartement 16 cm.

Fumure. — La fumure phosphatée précisée antérieurement, la fumure potassique à la dose de 120 unités (chlorure) ont été incorporées par le labour début décembre avec les collets de betterave. En raison de l'époque tardive du semis, il a été adjoint 20 unités d'azote (sulfate d'ammoniaque) aux façons culturales superficielles.

La fumure azotée, de l'ordre de 120 unités à l'état d'ammonitrate, a été fractionnée et répartie sur la base de 70 unités le 1[er] mars et de 55 unités le 20 avril, au début de la montaison.

Observations culturales. — L'année 1960, succédant à une année exceptionnellement chaude et sèche, a été caractérisée de nouveau par un déficit en eau d'environ un tiers, comparativement au régime pluviométrique moyen de l'hiver et du printemps. Mais à partir de mi-juin un régime humide tend à s'instaurer et devient prédominant jusqu'à la fin de l'année.

La végétation du blé, un peu ralentie par la sécheresse du printemps, s'est poursuivie normalement avec le super et les scories. Avec les phosphates naturels la croissance a été gênée, puis freinée, non pas tant par la sécheresse, mais par la déficience en acide phosphorique immédiatement utilisable, quels que soient les reliquats de la fumure et les doses appliquées.

Récolte. — Le temps pluvieux et humide a retardé la récolte jusqu'au début de septembre. Les rendements en qx/ha sont indiqués dans le tableau.

	Apport P_2O_5 en 2 ans	Grain	Indices comparaison		Pailles et balles	Indices comparaison
Super	90 + 90	36,1 ± 0,94	100	89,8	56,4	86,2
Scories	—	30,5 ± 0,90	84,4	75,8	55,6	85
Ph. naturels	—	10,2 ± 0,14	28,2	25,3	20,5	31,3
Super	180 + 60	40,2 ± 0,87	100	100	65,4	100
Scories	—	33,5 ± 1,02	83,3	83,3	64,3	98,3
Ph. naturels	—	9,8 ± 0,26	24,3	24,3	17,4	26,6
Ph. naturels	360 + 90	10,4 ± 0,47		25,8	18,2	27,8

L'analyse statistique de ces résultats montre que les rendements en grains sont significatifs.

L'apport d'une fumure d'entretien en 2[e] année agit diversement suivant les formes employées, et la provenance des reliquats de la fumure phosphatée.

La récolte avec les phosphates naturels se maintient à un niveau très bas et à peu près constant. Elle n'est pas influencée par les reliquats de la fumure phosphatée et elle implique une participation minime de cette forme d'engrais à l'alimentation phosphorée du blé. Ces résultats leur confèrent une faible valeur fertilisante en sols de craie.

L'application massive d'une forte fumure à la remise en culture d'un sol de défriche de pins s'avère totalement inefficace. Malgré la richesse du sol en matière organique, favorable à une recrudescence des réactions biologiques et chimiques, l'acide posphorique est resté sous sa forme primitive à peu près insoluble et inassimilable après deux années de vieillissement.

Les scories, à effet plus lent que le super, se révèlent moins efficaces. Mais les reliquats de la fumure phosphatée procurent une augmentation de rendement significative de 3 qx en grains.

Le super, forme à action plus rapide que les scories, fournit des suppléments importants de rendement très significatifs par rapport aux scories, de l'ordre de 6,7 qx avec le traitement 180 + 60 et de 5,6 qx avec le traitement 90 + 90. L'arrière-action des reliquats provenant du super se traduit par un gain non négligeable et probant de 4 qx, 1.

Dans ce sol de craie, carencé en P_2O_5, en deuxième année de culture, le super conserve une nette supériorité sur les scories, les phosphates naturels, par contre, demeurent sans effet, et ne peuvent subvenir aux besoins de la plante.

Analyse de la récolte. — Les résultats rapportés à cent de matière sèche sont consignés dans le tableau.

	En unités P_2O_5	N	P_2O_5	K_2O
	Grain			
Super	90 + 90	2,46	0,58	0,86
Scories	—	2,66	0,50	0,84
Ph. naturels	—	3,10	0,62	1,01
Super	180 + 60	2,58	0,66	0,88
Scories	—	2.68	0,50	0,85
Ph. naturels	—	3,14	0,61	0,99
Ph. naturels	360 + 90	3,08	0,57	0,93
	Paille			
Super	90 + 90	0,54	0,12	1,23
Scories	—	0,61	0,12	1,23
Ph. naturels	—	0,77	0,15	1,55
Super	180 + 60	0,54	0,14	1,23
Scories	—	0,47	0,13	1,35
Ph. naturels	—	0,77	0,14	1,56
Ph. naturels	360 + 90	0,64	0,16	1,59

La composition minérale de la récolte se modifie, pour une même fumure N P K, avec les formes d'engrais phosphatés.

Les variations sont plus atténuées avec le super et les scories ; mais avec les scories, forme moins active, le grain tend à s'enrichir en azote et à s'appauvrir en acide phosphorique.

Avec les phosphates naturels une alimentation déficitaire en acide phosphorique se manifeste par une minéralisation plus élevée en azote et dans une proportion moindre en potasse, sans aucun profit pour le végétal, tandis que la teneur en acide phosphorique se maintient très voisine de celle de la plante bien alimentée avec le super.

Le végétal prélève le phosphore en fonction de ses besoins physiologiques et une déficience en cet élément ne provoque pas nécessairement un appauvrissement des tissus, mais elle ralentit et freine la formation dans la feuille des produits photosynthétisés indispensables à l'élaboration des tissus végétaux, en s'accompagnant d'une accumulation d'azote non utilisable.

Conclusions

Les phosphates naturels en sols de craie, même riches en matière organique doivent être considérés comme peu ou pas assimilables.

Les reliquats de cette forme, même très importants, sont restés en deuxième année sans effet sur la végétation.

Leur emploi, même dans les sols à potentiel élevé en acide phosphorique, n'est pas recommandable, ils ne sauraient compenser les pertes résultants des exportations par les récoltes.

Enfin, en sols de craie carencés en acide phosphorique, le superphosphate marque une nette supériorité, non seulement en 1re année, mais en 2e année sur les scories. Son emploi s'impose donc, et doit être toujours préconisé en pareille circonstance.

IV. — CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Le but de cette étude n'était pas de dénier toute valeur agricole aux phosphates naturels, mais de préciser leur comportement en sols de craie. Il n'est pas douteux que ce problème ne peut être résolu totalement aujourd'hui, mais il est bon de faire le point et de confronter les incertitudes avec les certitudes. Cette tentative ne semble pas inutile, puisque celle-ci nous apporte des arguments incontestables pour la période envisagée, mais elle mérite néanmoins d'être poursuivie.

La classification des phosphates naturels d'après leur degré de dureté est une méthode d'appréciation trop suggestive et très contestable. Il apparaît donc nécessaire en vue de leur commercialisation de se référer à un réactif chimique, suffisamment sélectif, pour les différencier. A ce sujet, il importe de tenir compte des dispositions de la loi qui régit le commerce des engrais en France et qui visent à interdire l'usage de toute indication concernant la solubilité de l'acide citrique pour les produits autres que les scories.

D'après cette étude, l'acide formique à 2 p. 100 présente toute garantie, il est suffisamment sélectif, et il permet de classer les phosphates naturels en fonction de leur structure pétrographique, étant bien précisée l'absence de toute corrélation entre la solubilité dans le réactif et leur effet fertilisant.

L'efficacité des phosphates naturels, qui varie, d'une part, suivant leur structure physique, leur état d'agrégation ou leur dureté et, d'autre part, suivant la nature des combinaisons dans lesquelles ils sont associés avec les autres substances, est surtout conditionnée par la nature du sol auquel on les apporte.

La Science Agronomique est parfaitement d'accord sur ces points. Elle reconnaît que leur emploi doit être strictement limité aux sols minéraux ou organiques à réaction acide, en accordant la préférence aux phosphates terreux tendres, comme ceux de Gafsa en particulier, finement moulus.

Toutefois on a quelquefois laissé entendre que dans les autres sols à réaction alcaline, donc plus ou moins calcaires, il serait possible de parvenir à des résultats comparables à ceux obtenus avec les formes à action rapide, à condition de les employer dans des sols bien pourvus en matière organique, ou en association avec le fumier ou des matières organiques d'origine végétale, et initialement bien pourvus en cet élément. Les phosphates naturels en se dissociant lentement et progressivement sous l'action des agents bio-chimiques compenseraient ainsi les prélèvements par les récoltes, en conservant au sol son potentiel initial.

Les essais de laboratoire sur le comportement des phosphates naturels en sols de craie, en ayant recours au citrate de soude comme réactif d'extraction de l'acide phosphorique, montrent que les phosphates naturels tendres finement moulus privés ou associés à une matière organique végétale fraîche, comme l'engrais-vert, se maintiennent sous leur forme initiale et demeurent, par conséquent, à peu près inassimilables après deux ans de vieillissement.

Les expériences menées pendant deux années en sol de craie sur défriche de pins, carencé en P_2O_5, confirment les travaux de laboratoire et permettent de conclure à l'inefficacité des phosphates naturels finement moulus, quelles que soient les doses utilisées.

Les reliquats laissés par les phosphates naturels, si importants qu'ils soient,

ne participent pas à l'alimentation phosphorée, et ne sauraient en aucun cas contribuer au maintien du potentiel du sol en cet élément.

Il apparaît aussi chimérique de croire que l'on puisse augmenter l'effet des phosphates naturels en les associant au fumier ou aux engrais-verts dans les sols de craie.

En définitive, dans les sols de craie, à réaction fortement alcaline, et dans l'état actuel de la question, l'emploi des phosphates naturels tendres, même finement moulus, doit être formellement déconseillé.

Dans les sols carencés en acide phosphorique les engrais phosphatés solubles, comme le super, s'affirment nettement plus actifs et plus efficaces que les engrais phosphatés hyposolubles, comme les scories ; la même constatation avait été faite antérieurement pour le phospal. Dans de telles situations, il faut toujours accorder la préférence aux formes solubles à action rapide.

Une action de l'engrais-vert particulièrement avantageuse, qui a été mise indirectement en évidence dans ces expériences, mérite d'être soulignée, elle concerne la conversion d'une fraction non négligeable des réserves phosphatées du sol, temporairement inutilisables, en des formes rapidement mobilisables, au cours du processus de la dégradation de l'engrais-vert.

D'autre part, les réserves phosphatées du sol, constituées par les reliquats des fumures minérales ou organiques, et la minéralisation des résidus des récoltes, rétrogradent progressivement et lentement vers des formes peu ou plus difficilement assimilables.

Reçu pour publication en septembre 1961.

SUMMARY

CONTRIBUTION TO THE STUDY OF NATURAL PHOSPHATES IN CHALK SOILS

The natural phosphates are classified according to the degree of their hardness, into soft, demi-hard and hard phosphates, and this apt classification permits a subdivision into intermediate grades between the three characteristic classes.

Some French and foreign authors had suggested various chemical reagents, particularly carbonic acid and certain organic acids, for the differentiation of natural phosphates ; formic acid in a 20 p. 100 aqueous solution may fulfill the commercial requirements in this respect.

Though finely ground soft natural phosphates are useful for certain mineral or for organic soils of acid reaction, it is questionable whether they are suitable for highly alkaline soils, such as chalk soil, even in conjunction with organic amendments, as suggested by certain propaganda organs.

With a view to solving this problem, laboratory and field experiments had been conducted.

In chalk soils treated with finely ground soft natural phosphates, in absence or presence of organic vegetable matter, extraction with sodium citrate at 35 g per litre in aqueous solution showed that phosphorus was maintained in its original unavailable form throughout two years of ageing.

In a soil formerly under conifers, and thus well provided with organic matter but poor in phosphorus, application of finely ground soft natural phosphates in increasing amounts failed to increase the yields of beets in the first year and of wheat in the second, as compared with ordinary superphosphate or basic slag.

Fressings with natural phosphates, even though they may leave high phosphorus residues in the soil, do not contribute to the phosphorus nutrition of crops and to the maintenance of the phosphorus potential of soils, and may lead to regular decreases in yields with the progressive exhaustion of the phosphorus reserves existing.

As for the phosphate fertilying of calcareous soils, and especially of chalk soils, the use of finely ground soft natural phosphates should definitinely be discouraged.

ZUSAMMENFASSUNG

BEITRAG ZUM STUDIUM DER NATURPHOSPHATE IN KREIDEBÖDEN

Die Naturphosphate sind nach ihrem Härtegrad in weiche, halbweiche und harte Phosphate eingeteilt. Diese Bewertung ist rein suggestiver Art, desto mehr man neben diesen drei charakteristischen Gruppen eine ganze Zwischenskala kennt.

Französische und ausländische Autoren haben schon verschiedene chemische Reagenzien vorgeschlagen, insbesondere Kohlendioxyd und organische Säuren.

Unter letzteren könnte die Ameisensäure in 20-prozentiger Lösung die nötigen Bedingungen zu einer Differenzierung der Naturphosphate auf ihre Kommerzialisierunghin erfüllen.

Kann man, insofern weiche, fein gemahlene Naturphosphate in gewissen Mineral-oder organischen Böden mit saurer Reaktion Verwendung finden, das gleiche für sehr alkalische Böden, wie z. B. Kreideböden sagen, selbst wenn diese organisch verbessert wurden, wie es eine gewisse Propaganda glaubhaft macht ?

Diese Frage zu lösen, wurden Versuche gleichzeitig im Laboratorium und im Felde durchgeführt.

Das Verhalten der fein gemahlenen Naturphosphate, mit oder ohne pflanzenorganischen Stoffen, in Kreideböden, durch Natroncitrat in wässriger Lösung (35 g/l) als Extraktreagens verfolgt, zeigt, dass die Phorphorsäure in seiner ursprünglichen, d. h. assimilierbaren Form während zwei Jahre Alterns erhalten bleibt.

Steigende Gaben weicher, fein gemahlener Naturphosphate auf gerodeten Kieferboden, mit organischer Subzstanz angereichert, jedoch mit Mangel an Phosphorsäure, konnten den Ertrag im ersten Jahr auf Rüben, im 2. Jahr auf Weizen gegenüber gewöhnlichem Super oder Thomasmehl nicht steigern.

Die von Naturphosphaten oder ihren Resten herrührende Phosphatdüngung, so bedeutend auch die Gaben seien, nimmt keinen oder nur geringen Anteil an der Phosphorernährung, und kann somit nicht zur Erhaltung des Potentials dieses Nährstoffs im Boden beitragen ; auf jeden Fall würde sich, nach progressivem Erschöpfen der vorhandenen Reserven, eine Fegelmässige Ernteverringerung einstellen.

So muss, im heutigen Stadium der Phosphatdüngung der kalk-und besonders kreidehaltigen Böden von der Verwendung weicher, auch noch so fein gemahlener Naturphosphate aufs Entschiedenste abgeraten werden.

К изучению природных фосфатов в меловых почвах.

Е. РАДЭ (Шалон-на-Марне).

Природные фосфаты разделяются в зависимости от степени их твердости на фосфаты мягкие, полутвердые и твердые. Это разделение конечно условно тем более что на-ряду с этими тремя характерными группами известна целая промежуточная серия.

Некоторые, как французские, так и иностранные авторы предлагали уже различные химические реактивы, в частности, угольную кислоту и некоторые органические кислоты.

Из указанных реактивов, 20-ти процентный водный раствор муравьиной кислоты, выполняет по всей вероятности все необходимые условия чтобы дифференцировать природные фосфаты в виду их коммерциализации.

Если мелко размолотые мягкие природные фосфаты находят применение в некоторых минеральных почвах, или в органических почвах с кислой реакцией, спрашивается, могут-ли быть достигнуты в почвах щелочной реакции, каковыми являются например меловые почвы результаты приводимые определенной пропагандой по этому вопросу.

Чтобы дать на это ответ были проведены одновременные полевые и лабораторные опыты.

Действие мелко размолотых мягких природных фосфатов примененных или в чистом виде, или в соединении с органическими веществами растительного происхождения на меловых почвах, прослеженное при

помощи водного раствора лимонокислого натрия (35 гр. на литр) в качестве извлекателя, доказало, что фосфорная кислота остается в своей первичной усвояемой форме в течении двух лет старения.

Постепенное увеличение подкормок почв сосновой нови хорошо снабженных органическим веществом, но испытывающих недостаток фосфорной кислоты, при помощи мягких мелко размолотых природных фосфатов, не помогло увеличить, по сравнению с суперфосфатом и шлаком, ни урожай свеклы в первый год по раскорчеванию, ни урожай пшеницы на второй год.

Фосфорное удобрение при помощи природных фосфатов, так же как и остатки этого удобрения, как-бы велики эти остатки ни были, или мало помагают фосфорному питанию растения, или вовсе не принимают в нем участия, и не оказывают поэтому никакого влияния на сохранение фосфорного потенциала почвы; так или иначе, после постепенного исчерпания прежних фосфорных запасов наблюдается регулярное понижение урожайности.

В конечном итоге, в настоящем положении вопроса фосфорных удобрений известковых, и особенно, меловых почв, применение природных фосфатов, даже мягких и мелко размолотых не советуется в этом случае.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Barbier G., Marquis A., 1944. Sur l'évolution des engrais phosphatés en sol nu et leur destin en sol cultivé. *Ann. Agron.*, 409.

Barbier G., Chabannes J., Durroux M., 1948. Retour spontané à l'état mobile dans le sol de la fraction dite rétrogradée des engrais phosphatés et potassiques. *Ann. Agron.*, 521.

Boischot P., Coppenet M., Hébert J. Fixation de l'ion phosphorique sur les sables calcaires des sols. *Ann. Agron.*, 103.

Carbona F., 1956. Industrie Chimique.

Gesiger L., Pulver H., 1953. Contribution à l'étude du problème de la différenciation des phosphates naturels durs et tendres. *Annu. Agric. Suisse.*

Radet E., 1957. Détermination de l'acide phosphorique assimilable dans les sols de craie par le réactif au citrate de soude et évolution des phosphates solubles. *Ann. Agron.*, 619.

Radet E., 1958. Evolution des phosphates hyposolubles dans les sols de craie. *A. F. E. S.*, nº 3, 102.

Ann. agron., 1961, **12** (5), 489-512.

631. 473 (44)

ÉTUDE DES SOLS DE LA VALLÉE DE L'ORAIN ET DE LA GROZONNE (JURA)

J. DEJOU et Suzanne MERIAUX

Station d'Agronomie, Centre de Recherches agronomiques du Centre-Est, Dijon.

SOMMAIRE

La vallée de l'Orain et de la Grozonne (Jura) est formée par des sols hydromorphes à profil complexe, très argileux et humifères ; elle est occupée par des prairies de médiocre potentialité. La mise en valeur de ces sols peut être envisagée après assainissement, ameublissement du sous-sol compact et fertilisation.

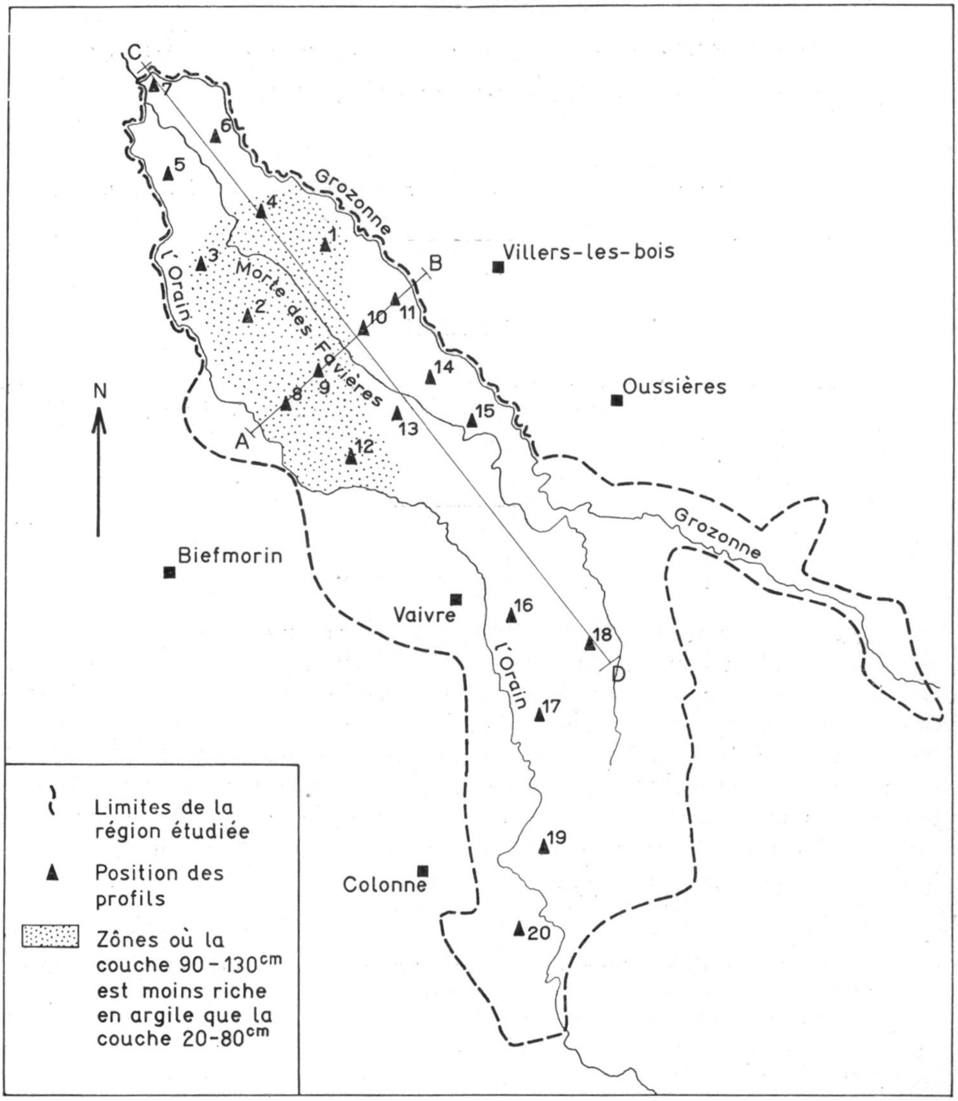
I. — But de l'étude

L'étude des sols de la vallée de l'Orain et de la Grozonne a été entreprise à la fin de l'année 1960 à la demande du Service du Génie Rural de Lons le Saunier. Il s'agit d'une région basse, marécageuse, mal drainée, occupée par la prairie qui couvre environ 800 hectares, et régulièrement inondée en hiver par les crues des deux rivières. L'écoulement de l'eau, difficile dans les conditions actuelles, est très défavorable à la production fourragère, de quantité et de qualité fort médiocres. Les agriculteurs des cinq communes riveraines, par la constitution d'un syndicat intercommunal pour la mise en valeur de ce terroir, se proposent d'y entreprendre les travaux de drainage, après une étude pédologique confiée à la Station d'Agronomie de Dijon.

II. — Situation géographique et aperçu géologique sommaire (graphique 1)

La zone prospectée, limitée par les deux rivières Orain et Grozonne, se situe dans le département du Jura, entre Villers-les-Bois et Biefmorin, à quelques 10 km. au N. W. de Poligny. Elle est occupée uniquement par les alluvions modernes de ces cours d'eau formées par un matériel très riche en éléments fins et homogène dans l'ensemble de son faciès. Il s'agit d'une argile avec une fraction limoneuse importante, entièrement décalcifiée, et dépourvue de toute particule de dimension supérieure à 2 mm. Ce matériel, transporté et sédimenté en un petit bassin, dont l'altitude générale oscille autour de 220 m (Cotes extrêmes 228,2 m et 216,3 m) tire très probablement son origine des formations Plio-Quaternaires environnantes et des

argiles de décalcification qui constituent des dépôts souvent puissants, comme le précise la notice explicative de la feuille géologique de Lons le Saunier (n° 138). Ces dépôts, déjà fins, ont pu ensuite être remaniés, retriturés, soumis aux influences périglaciaires, et atteindre un degré de pulvérisation tel qu'ils ne comportent guère actuellement que des particules inférieures à 50 microns.



GRAPHIQUE I. — Vallée de l'Orain-Grozonne.

Autour de ce bassin légèrement incliné vers l'aval (12 m de dénivellation entre les points extrêmes), on rencontre une bordure étroite de formations Plaisanciennes avec des sables et des argiles, puis les faciès beaucoup plus étendus du Pliocène

supérieur et du Quaternaire ancien, représentés par des marnes, des sables et des limons.

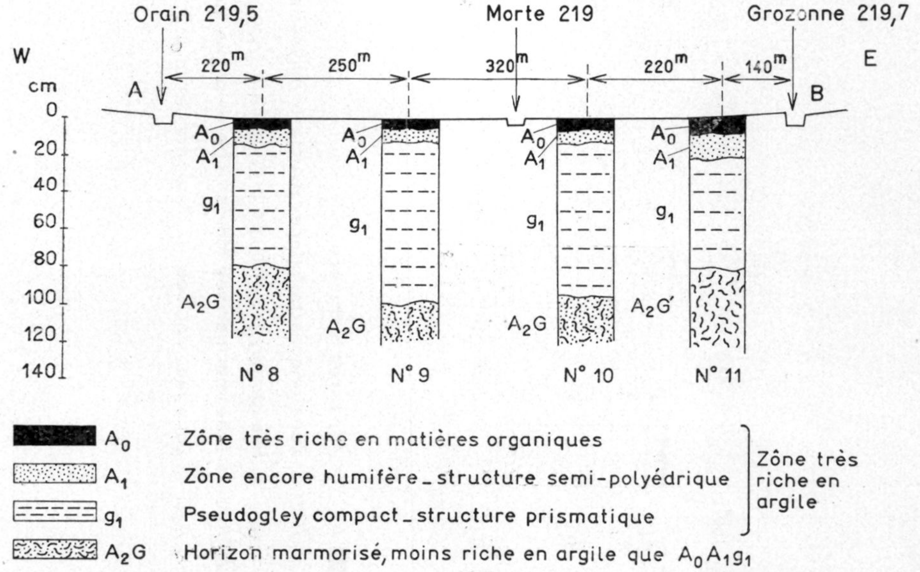
Le centre de ces alluvions est traversé par la Morte des Favières, qui s'écoule entre l'Orain et la Grozonne ; ces trois cours d'eau déterminent l'existence d'une nappe superficielle soumise à des oscillations dont l'amplitude varie avec l'intensité des précipitations, et dont le niveau ne semble pas identique dans l'ensemble de la région étudiée ; c'est ainsi, par exemple, que pour les profils 6 et 8, la nappe phréatique se situait à 90 cm de profondeur le 16 juin 1961, alors que le même jour, elle n'avait pas été trouvée à 120 cm. lors de l'examen du profil nº 16. De plus, les berges de ces rivières sont à une cote légèrement supérieure à celle de leur bassin, déterminant ainsi des cuvettes de faible profondeur d'où l'évacuation des eaux est très difficile en période de crues.

Quant à la pente moyenne des 3 rivières, elle est respectivement de 1,94 p. 1 000-1,58 p. 1 000 et 2,18 p. 1 000 pour l'Orain, la Morte des Favières et la Grozonne.

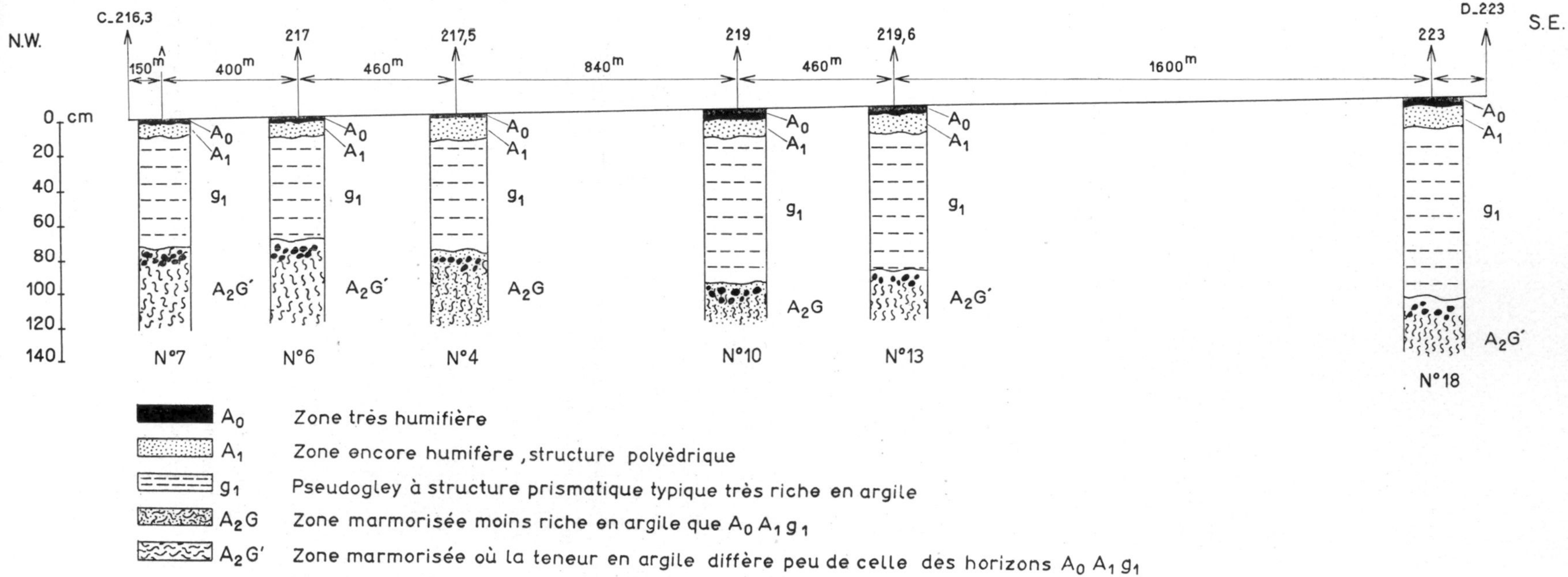
III. — Étude pédologique de la région. Description de deux profils

20 profils ont été examinés et analysés dans la région ; 15 ont été réservés à la partie Aval qui offrait la végétation la plus mauvaise, et 5 seulement dans la zone Amont, qui, de l'avis général des agriculteurs, représente un terroir de meilleure potentialité culturale ; les observations ont été notées jusqu'à 130 cm et, pour le profil nº 8, elles ont été relevées jusqu'à 210 cm.

Bien que des différences se manifestent entre les sols des deux extrémités de cette vallée, leur profil d'ensemble demeure assez homogène dans sa constitution, comme le montrent une coupe transversale suivant les repères A B (graphique 2) et une coupe longitudinale le long de la Morte des Favières (graphique 3) Aussi la



Graphique II. — Coupe transversale — Vallée de l'Orain



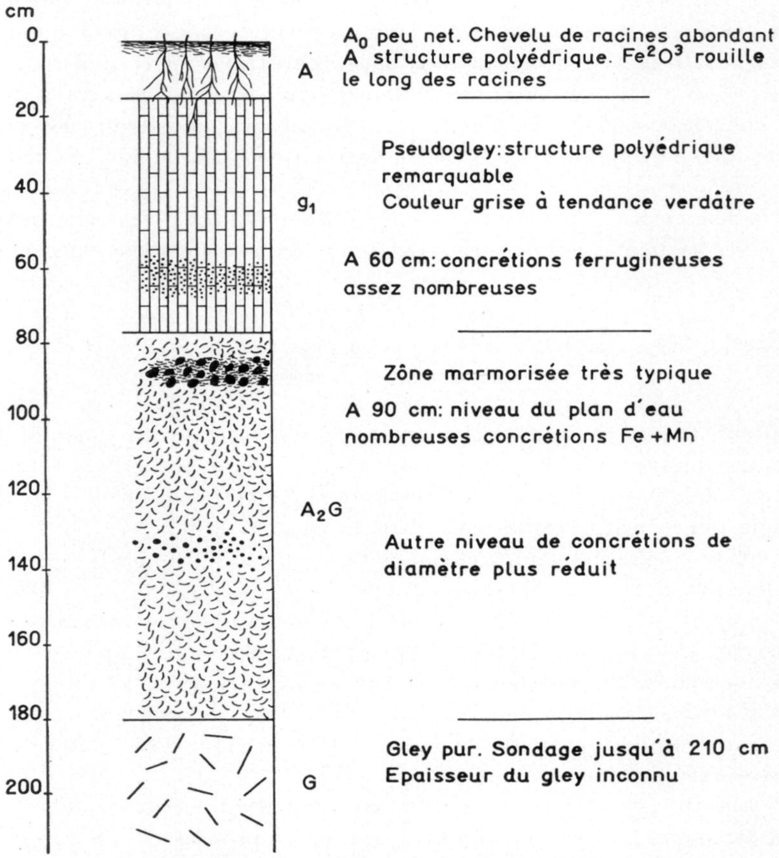
GRAPHIQUE III. — Coupe longitudinale suivant la Morte des Favières. (Pente moyenne entre D et C : 1,67 ‰).

description de deux d'entre eux suffira-t-elle pour en donner une physionomie représentative.

A) *Profil n° 8 situé en aval de la vallée, à 200 m à l'est de l'Orain*

Le graphique 4 montre les horizons suivants :

1) *Un horizon A_0* (0-5 cm), foncé, très riche en matières organiques (15,6 p. 100) à décomposition lente par suite des conditions anaérobies et à pH = 6. Texture très argileuse, compacte ; structure grumeleuse ; très nombreuses racines constituant un épais feutrage.



GRAPHIQUE IV. — Profil n° 8. Vallée de l'Orain.

2) *Un horizon A_1* (5-15 cm) moins foncé que A_0, mais encore humifère (6 p. 100 de matière organique) à texture un peu moins compacte, et à structure polyédrique évoluant à la base vers la structure prismatique franche. Les racines occupent cette zone de façon satisfaisante, descendant verticalement et se ramifiant ; mais au niveau de 15 cm où l'on aborde un troisième horizon plus compact, certaines s'étalent à son contact, alors que d'autres réussissent à pénétrer plus profondément. Il faut aussi noter que le fer oxydé, de couleur rouille, constitue une gaine le long du passage de ces racines et des fissures du sol.

3) *Un horizon* g_1 (15-80 cm) à pseudogley de texture compacte, et de structure prismatique très nette, offrant des colonnes hexagonales caractéristiques.

Entre les prismes aux angles bien marqués s'établit un système complexe de microfissures, qui indiquent parfois le passage des racines, et qui sont comblées par des oxydes ferriques de couleur rouille : la majeure partie de l'horizon, au moment de l'observation en fin d'automne, apparaissait verdâtre, grâce à son fer réduit, donnant l'apparence d'un gley pur ; au mois de juin, sa couleur était grise à tendance verdâtre. Il s'agit bien d'un pseudogley aux caractères atténués. A 60 cm, on note également la présence de petites concrétions ferrugineuses.

4) *Un horizon* A_2G (80-180 cm) marmorisé de façon uniforme. De teinte généralement jaune, il se présente avec des traînées limoniteuses caractéristiques et des taches beige clair. A 90 cm, niveau de la nappe phréatique au 16 juin 1961, on rencontre de grosses concrétions ferro-manganiques, dont certaines ont 1 cm de diamètre ; d'autres concrétions, mais de moindres dimensions, apparaissent aussi entre 130 et 150 cm. Cet horizon contient en outre des matières charbonneuses transportées avec les alluvions.

5) *Un horizon G.* — à partir de 180 cm et observé jusqu'à 210 cm. C'est un gley profond, avec sa teinte verte bien particulière, due à la présence exclusive du fer ferreux.

B) *Profil n° 19 à 500 m à l'est de Colonne, à proximité de la route Colonne-Grange Dauphin (Cote 225,7)*

Ce profil, situé tout à fait en amont de la vallée, montrait en automne 1960 un ressuyage du sol beaucoup plus accentué que dans la partie aval soumise à la submersion. Malgré les abondantes précipitations de cette saison, il était demeuré sain ; aucun suintement n'était observé dans les couches du sol, et la végétation de la prairie était supérieure en quantité et en qualité à celle de Villers-les-Bois et Oussières.

La description de ce profil est la suivante :

1) *Un horizon* A_1 (0-17 cm) de couleur brune, où la teneur en matière organique n'est plus que de 8,8 p. 100, à texture compacte, et à structure grenue. Les racines sont très abondantes et pénètrent facilement dans toutes les directions.

2) *Un horizon* A_2 (17-27 cm), brun clair, à texture un peu moins compacte, et à structure intermédiaire entre les types grenu et prismatique. Les racines sont encore nombreuses dans cette zone.

3) *Un horizon* g_1 (27-110 cm) à structure prismatique, représentant un pseudogley, aux caractères plus atténués encore que celui du profil n° 8 dans sa partie supérieure, avec une couleur gris pâle, passant au gris verdâtre vers 60 cm. A noter ici la présence de quelques rares petits cailloux de nature calcaire. Le pH atteint d'ailleurs 7,7.

4) *Un horizon* A_2G à partir de 110 cm et observé jusqu'à 130 cm, correspondant à la zone marmorisée.

Ce profil est intéressant à plusieurs titres ; il faut retenir la plus grande profondeur de la couche arable et sa structure favorable jusqu'à 27 cm, ce qui facilite la pénétration des racines, mais aussi l'allure variable de l'horizon g_1 et l'apparition de la zone marmorisée seulement à partir de 110 cm ; tous ces caractères s'expliquent par un écoulement des eaux plus facile que dans la partie aval de la région.

C) *Interprétation de ces profils*

Ces profils assez complexes sont dûs à la superposition d'un pseudogley à hydromorphie de surface et d'un gley profond. En effet, l'horizon *g1* se constitue par suite de la submersion temporaire de la région lors des périodes de forte pluviosité ; cette eau, presque stagnante, accentue le processus de gleyfication, réduit et solubilise le fer à l'état de complexe ferreux, un laps de temps très court étant suffisant pour la mise en œuvre de ces transformations. L'eau une fois évacuée, il y a réoxydation.

Quant à la zone A_2G marmorisée, elle est due aux oscillations de la nappe phréatique qui détermine en profondeur une couche de gley-type, observée notamment à 180 cm dans le profil n° 8 le 16 juin 1961.

Ce gley est une formation extrêmement instable ; de couleur uniformément verdâtre lors de son prélèvement le 16 juin, il a suffi d'une exposition à l'air de 24 heures au laboratoire pour provoquer l'oxydation du fer ferreux, qui devint très intense dès le 19 juin, où elle atteignit son stade définitif. L'équilibre des réactions une fois établi après 72 heures environ, il n'y eut plus ensuite de modifications dans l'aspect des échantillons, tout à fait semblables alors à ceux de la zone marmorisée. Cette observation illustre la rapidité des phénomènes d'oxydo-réduction dans lesquels le fer est engagé et les possibilités de transformations incessantes au sein du système pseudo-gley et gley pur.

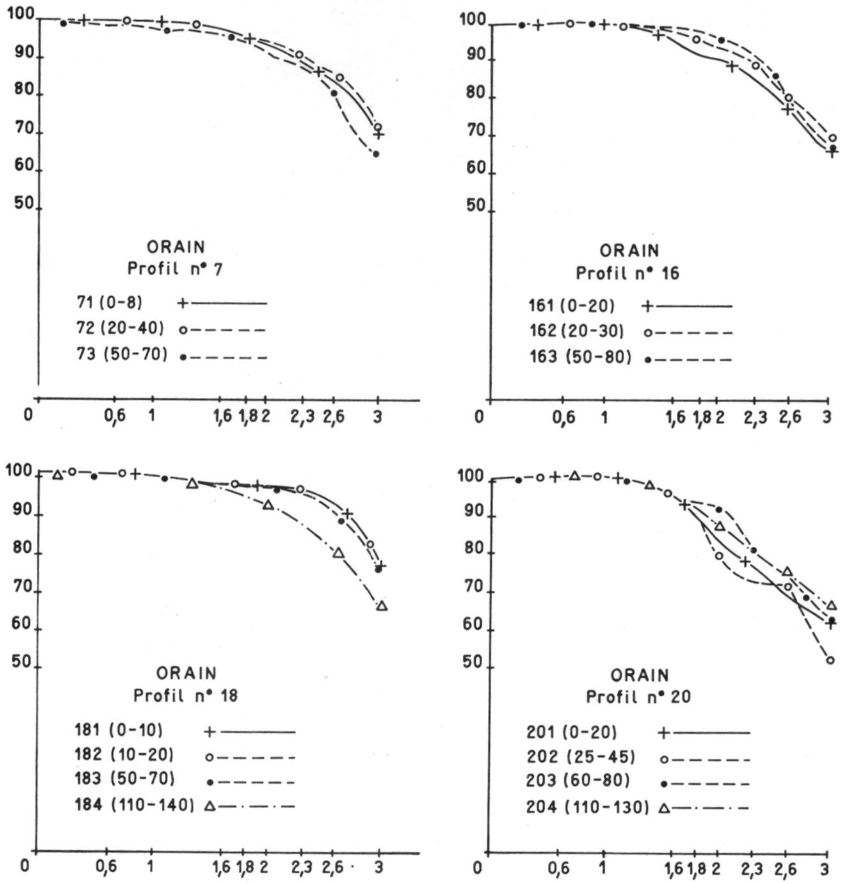
IV. — Composition granulométrique (Tableau 1 en annexe)

Les analyses granulométriques confirment la grande richesse en fractions fines de tous les profils et de tous les horizons. *L'argile est prédominante* et sa teneur atteint ou dépasse 58 p. 100 (80 p. 100 de la matière minérale) dans 16 profils sur les 20 étudiés. La proportion de limon oscille autour de 15 p. 100 en surface, mais elle s'accroît en profondeur où elle atteint souvent 25 p. 100 dans la couche 100-130 cm. Sauf dans 4 situations (n° 11-15-19-20), les fractions supérieures à 50 microns n'interviennent que pour une part infime du total. On note l'absence de cailloux et graviers, ainsi que de calcaire, à l'exception toutefois de la base des profils 10 et 16.

Les courbes donnant la répartition des effectifs granulométriques entre 2 000 μ et 200 μ affectent des tracés de même allure, et ceci pour l'ensemble de la région (graphiques 5 et 6).

La granulométrie précise aussi qu'il n'existe pratiquement pas de mouvement d'argile le long des profils ; pour 13 d'entre eux (Ex. n° 7-16-18-20) les courbes sont confondues sur tout le tracé, ce qui indique des conditions de dépôts homogènes, une distribution remarquablement identique des particules et un manque d'évolution en raison de la proximité du plan d'eau et de ses oscillations.

Toutefois des différences dans la composition granulométrique apparaissent en profondeur dans certaines situations au nord de la région (sols n° 1-2-3-4-5-8-9-12) ; c'est la zone hachurée de la carte au 1/20 000^e présentée au début de ce mémoire. Comme le précisent les 4 courbes des profils n° 2-3-8-9 (graphique 6) les horizons inférieurs sont alors sensiblement *moins argileux* que les horizons supérieurs. Ces différences peuvent n'être qu'assez minimes comme le long du profil n° 9 où les teneurs en argile sont respectivement de 64 p. 100 pour la couche 0-15 cm et 57 p. 100 pour la



Graphique V. — Courbes granulométriques.

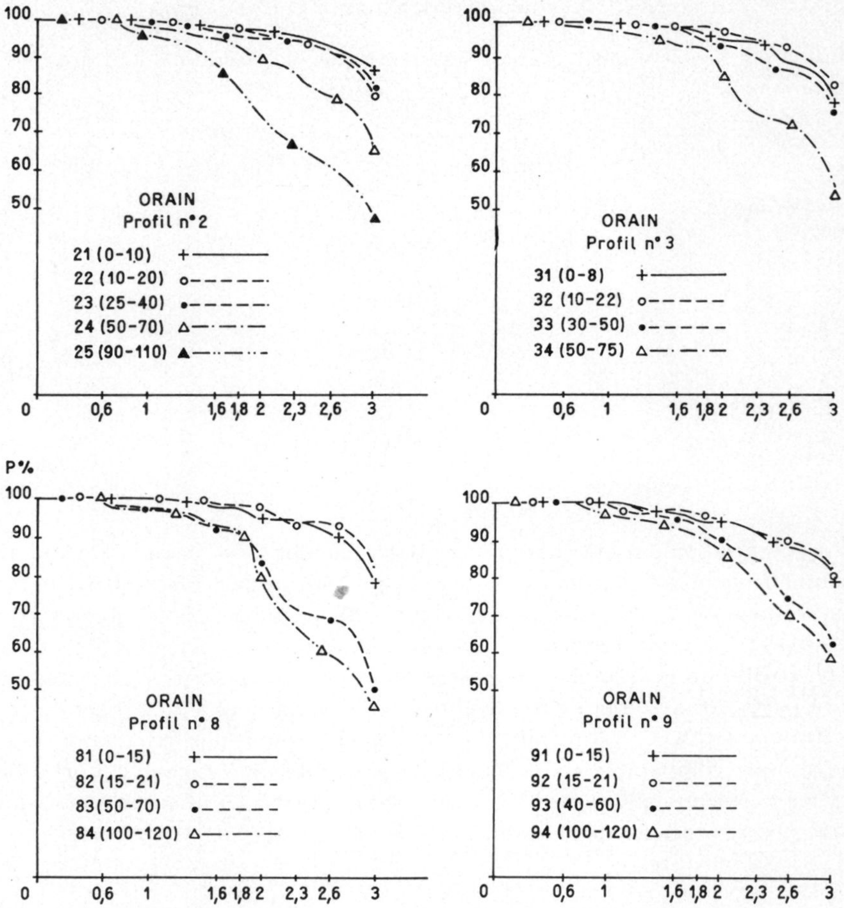
zone 100-120 cm, mais par contre elles sont très accusées dans certains cas (exemple : profil n° 2 : 67 p. 100 et 43 p. 100 — profil n° 3 : 64 p. 100 et 50,5 p. 100 — profil n° 8 : 69,5 p. 100 et 43 p. 100).

Il semble qu'il s'agisse là de deux systèmes d'alluvions : la couche 0-90 cm représentant les alluvions récentes, très riches en argile, et la couche 90-140 cm, un autre type d'alluvions plus anciennes, moins riche en ce même matériel.

En résumé, on peut définir ces sols de l'Orain et de la Grozonne comme des sols très argileux, alluviaux, à gley profond, et pseudogley à hydromorphie de surface superposés.

V. — Matière organique

L'ensemble de ces sols se caractérise par une grande richesse en matière organique non minéralisée. En surface, les teneurs varient de 7,3 p. 100 (profil n° 20) à 19,7 p. 100 (profil n° 2) ces résultats étant acquis par la détermination du carbone (matière organique = C × 1,75). Il s'agit d'un Mull avec C/N compris entre 10 et15,6.



GRAPHIQUE VI. — Courbes granulométriques

Cette matière organique est encore abondante jusqu'à 25 cm : 6 à 7,5 p. 100 ; entre 50 et 80 cm, sa teneur dépasse souvent 2 p. 100 ; dans les couches plus profondes, elle est en général inférieure à 1 p. 100. Quant au rapport C/N, il diminue classiquement avec la profondeur.

L'abondance de cette matière organique a une incidence marquée sur la structure de nature grumeleuse dans la zone 0-10 cm, sur la stabilité de cette structure, et également sur la rétention de l'eau.

VI. — ÉTUDE DE LA FRACTION ARGILEUSE EXTRAITE DES SOLS DE LA VALLÉE DE L'ORAIN ET DE LA GROZONNE

L'étude minéralogique de la fraction argileuse $< 2\mu$ a été conduite à l'aide de plusieurs méthodes classiques, dont les données doivent se recouper pour permettre d'établir un diagnostic valable.

a) *Répartition granulométrique de la fraction argileuse*

Elle a été mesurée par l'analyse densimétrique. Les résultats sont groupés dans le tableau suivant.

Dimension des particules en microns	Échantillon 73		Échantillon 124		Échantillon 204	
	% de la terre fine	% de la fraction argile < 2 μ	% de la terre fine	% de la fraction argile < 2 μ	% de la terre fine	% de la fraction argile < 2 μ
1,15-2	4,5	7,3	2	3,85	3	5
0,80-1,15	0,5	0,8	2	3,85	2	3,33
0,70-0,80	3	4,9	2	3,85	1,5	2,5
0,63-0,70	2	3,2	0	»	0,5	0,83
0,53-0,63	0,5	0,8	0	»	0	»
0,35-0,53	0,5	0,8	0	»	0	»
< 0,35	51	82,2	46	88,5	53	88,3
Total	62	100	52	100	60	100

Ces chiffres traduisent une remarquable homogénéité dans la composition granulométrique des échantillons, et laissent prévoir un matériel argileux de nature identique dans les 3 cas. Ils sont constitués de particules de diamètres compris entre 0,7 μ et 2 μ qui interviennent respectivement pour 13,1 p. 100, 11,55 p. 100 et 11,66 p. 100 de l'ensemble ; les particules 0,35 μ-0,7 μ sont négligeables et la majeure partie du matériel est représentée par des particules très fines < 0,35 μ. J. J. FRIPIAT et M. C. GASTUCHE (1952) avaient trouvé une répartition granulométrique assez comparable en étudiant une Kaolinite de Yangambi (Congo belge). L'extrême finesse des alluvions de l'Orain se surajoutant à leur haute teneur en argile est donc une autre cause de la grande compacité de leurs sols.

b) *Analyses aux rayons X*

Elles ont été effectuées à l'Institut de Géologie de la Faculté des Sciences de Clermont-Ferrand par Mlle F. BOUDIER (1) suivant une technique décrite par G. MILLOT (1949) ; chaque échantillon d'argile est soumis au rayonnement X de trois façons différentes :

1° à l'état naturel, sans le moindre traitement ;

2° après traitement par la chaleur à 550° ;

3° après traitement par le glycérol, ce constituant ayant la propriété de dilater les feuillets de la montmorillonite, et de provoquer l'apparition de nouvelles raies caractéristiques.

Les équidistances réticulaires sont les suivantes :

4,50 Å très forte : 9
2,60 Å forte : 6
2,39 Å moyen : 4
1,51 Å forte : 6

Le dépouillement des diagrammes s'avère difficile, car aucune raie à grand écartement, essentielle pour une telle détermination, ne s'identifie sur le cliché.

(1) Nous adressons nos très vifs remerciements à Melle BOUDIER et J. CHAUSSIDON.

Par contre, les diagrammes des trois échantillons sont semblables, ce qui appuie l'hypothèse de l'identité du matériel argileux dans la vallée ; de plus, le traitement n'entraine aucune modification dans le diagramme de ces échantillons.

Cette dernière remarque, très importante pour le diagnostic minéralogique, ainsi que la comparaison des équidistances calculées avec celles données par R. E. GRIM (1953) pour les principaux minéraux argileux, permettent de penser qu'il s'agit d'une Illite ; en effet ce minéral est pratiquement le seul, d'après G. MILLOT, à conserver ses raies à la suite des traitements à 550° et par le glycérol.

c) *Mesures des surfaces des argiles*

Elles ont été exécutées par J. CHAUSSIDON ([1]), à la Station centrale d'Agronomie de Versailles.

1) *Surface externe.* — Elle a été calculée par la méthode de BRUNAUER-EMMETT et TELLER après adsorption d'azote à basse température par les échantillons argileux. Les résultats suivants ont été observés :

Echantillons	Surface externe (B. E. T.)
73	96 m2/gramme
124	89
204	94

On observe une grande analogie entre les résultats, ce qui renforce l'hypothèse de l'identité du minéral argileux.

Les données citées par R. E. GRIM et d'autres puisées dans les travaux de R. A. NELSON et S. B. HENDRICKS (1954) montrent, pour une Illite de dimension 0,3 μ traitée à 30°, une surface spécifique de 97 m^2/gramme. Bien que l'application d'une seule technique s'avère insuffisante pour un diagnostic minéralogique, la grande concordance de cette valeur avec celles calculées par J. CHAUSSIDON pour un matériel de dimension très voisine permet de conclure à la nature illitique, très nettement dominante de ces argiles de l'Orain.

2) *Surface interne.* — Elle a été mesurée par la méthode de HENDRICKS et DYAL basée sur la rétention de l'éthylène-glycol. Il n'existe pratiquement aucune fixation de ce solvant organique entre les feuillets des argiles de l'Orain après déshydratation, ce qui traduit l'absence de surface interne de ces argiles. Notons que sur les échantillons traités à 600°, la mesure de la surface externe par rétention de l'éthylène-glycol donne des résultats de l'ordre de grandeur de ceux obtenus par la méthode B. E. T. Ainsi, les renseignements fournis par ce procédé d'analyse nous amènent à exclure dans les argiles de l'Orain la présence de Montmorillonite.

d) *Capacité d'échange de cations des argiles*

Elle a été déterminée après percolation d'une solution d'acétate d'ammonium neutre et normale. Les résultats sont les suivants :

Echantillons	Capacité d'échange en m. e. % grammes
73	47,45
124	51,45
204	50,45

Les chiffres sont très voisins, ainsi que l'identité des résultats précédents pouvait le laisser prévoir.

Si l'on se réfère aux travaux de R. E. GRIM (tableau nº 14, p. 129 de Clay Mineralogy), on note les valeurs suivantes :

Minéraux	Capacité d'échange en m. e. % grammes
Halloysite $4H_2O$	40–50
Montmorillonite	80–150
Illite	10–40
Chlorite	10–40

A la suite des études de surfaces, ces observations viennent confirmer l'absence de Montmorillonite dans les échantillons ; de plus, l'hypothèse de la présence d'Halloysite 4 H_2O n'est pas à retenir, car la mesure de sa surface externe se situe autour de 43 m^2/gr, c'est-à-dire très inférieure à celle trouvée à l'analyse. Restent l'Illite et la Chlorite dont les capacités d'échange de cations sont semblables, et pour lesquelles subsiste une difficulté d'identification, que l'on peut lever assez facilement par l'examen des rayons X et l'analyse chimique totale.

e) *Analyses chimiques totales* (M. SAJOT-J. DEJOU)

Elles ont été exécutées suivant la technique préconisée par le Laboratoire de Géologie et de Minéralogie de Clermont-Ferrand (1957). Les résultats sont consignés dans le tableau ci-après :

Composition chimique des argiles

Constituants chimiques	Échantillon 73 (50-70 cm)	Échantillon 124 (70-90 cm)	Échantillon 204 (110-130 cm)
H_2O −	2,35	2,46	2,59
H_2O +	10,63	11,20	10,32
SiO_2	48,76	47,86	47,85
Al_2O_3	25,58	25,45	25,97
Fe_2O_3	7,52	7,32	7,44
FeO	0,58	1,44	0,65
TiO_2	1,24	1,12	0,92
P_2O_5	n. d.	n. d.	n. d.
MnO	n. d.	n. d.	n. d.
MgO	2,77	2,70	2,62
CaO	0,34	0,28	0,55
K_2O	1,54	1,56	1,50
Na_2O	0,20	0,25	0,17
Total	101,51	101,64	101,68
Bases totales	4,85	4,79	4,84
SiO_2/R_2O_3	2,72	2,70	2,65
H_2O/R_2O_3	1,98	2,10	1,90
Bases$/R_2O_3$	0,32	0,31	0,31
Fe_2O_3/R_2O_3	0,16	0,15	0,15

N. B. $R_2O_3 = Al_2O_3 + Fe_2O_3$

Ces analyses chimiques viennent confirmer, à l'appui des déterminations précédentes, l'identité de nature minéralogique des trois échantillons d'argile de la vallée de l'Orain, malgré leur situation variable le long des profils. En particulier, les taux de SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 et K_2O sont très voisins.

Mais il est évident que la détermination de la composition chimique ne constitue pas à elle seule un processus d'identification des minéraux argileux. Elle complète simplement un diagnostic fixé à la suite des examens précédents. En effet, les variations dans les pourcentages d'oxydes peuvent être fort importantes, comme le montrent les travaux de E. M. BASTISSE (1947) et de R. E. GRIM (1953), sans que la nature du minéral en soit pour autant modifiée.

Ainsi, pour ne citer qu'un exemple, R. E. GRIM (Clay Mineralogy, p. 372), donne un certain nombre d'analyses d'Illites où le taux de Al_2O_3 oscille entre 15,88 p. 100 et 32,45 p. 100, c'est-à-dire du simple au double.

Cependant E. M. BASTISSE a analysé une Illite du Plaisancien très proche de nos résultats.

Constituants chimiques	Illite du Plaisancien n° 19 E. M. - BASTISSE *Ann. Agr.* p. 441 (1947)
SiO_2	49,05
Al_2O_3	26,35
Fe_2O_3	7,85
CaO	0,63
MgO	1,89
K_2O	4,88
Na_2O	0,67
H_2O	8,30

Mais c'est surtout l'étude des rapports moléculaires qui, mieux que l'analyse totale, précise un examen minéralogique, et qui assigne à ces argiles de l'Orain une identité de nature. E. M. BASTISSE a calculé les rapports moléculaires d'une douzaine d'Illites recueillies dans diverses régions de France. Ils varient comme suit :

$$\frac{SiO_2}{R_2O_3} : \text{ de } 2{,}08 \text{ à } 3{,}85$$

$$\frac{H_2O}{R_2O_3} : \quad 1{,}44 \text{ à } 2{,}16$$

$$\frac{\text{Bases}}{R_2O_3} : \quad 0{,}38 \text{ à } 0{,}90$$

$$\frac{Fe_2O_3}{R_2O_3} : \quad 0{,}16 \text{ à } 0{,}38$$

Les rapports moléculaires des argiles de l'Orain se situent bien dans ces limites. Toutefois il faut signaler la faible valeur du rapport, $\frac{\text{Bases}}{R_2O_3}$ due à une teneur exceptionnellement basse en K_2O, alors que, normalement, pour les illites, ce constituant représente 3,25 à 7,50 p. 100 du poids.

L'analyse chimique permet aussi d'exclure l'hypothèse de la présence de chlorite dominante. En effet pour ces minéraux, les teneurs en SiO_2 ne dépassent pas 32 p. 100 et les taux de FeO sont par contre très élevés (cf. R. E. GRIM).

Ce matériel argileux pouvant être considéré comme relativement pur, il est possible de calculer sa formule structurale, en s'inspirant des indications de G. MILLOT (1949). Les résultats sont les suivants :

Illite N° 73

$$Al^{0,68}\ Si^{3,32}\ Ti^{0,06}\ O^{10}\ \Big\|\ Al^{1,40}\ Fe^{0,39}_{III}\ Fe^{0,03}_{II}\ Mg^{0,29}\ \Big|\ (OH)^2\ \Big|\ K^{0,13}\ Ca^{0,02}\ Na^{0,02}$$

Illite N° 124

$$Al^{0,66}\ Si^{3,28}\ Ti^{0,06}\ O^{10}\ \Big\|\ Al^{1,43}\ Fe^{0,38}_{III}\ Fe^{0,08}_{II}\ Mg^{0,28}\ \Big|\ (OH)^2\ \Big|\ K^{0,14}\ Ca^{0,02}\ Na^{0,03}$$

Illite N° 204

$$Al^{0,66}\ Si^{3,29}\ Ti^{0,05}\ O^{10}\ \Big\|\ Al^{1,47}\ Fe^{0,39}_{III}\ Fe^{0,04}_{II}\ Mg^{0,27}\ \Big|\ (OH)^2\ \Big|\ K^{0,13}\ Ca^{0,08}\ Na^{0,02}$$

En conclusion, chacune des méthodes appliquées a mis en évidence quelques propriétés des argiles de l'Orain. S'il ne fait désormais plus de doute qu'il s'agit bien du même matériel sur toute l'étendue de la zone prospectée, l'association des renseignements recueillis grâce aux analyses, tend à prouver que l'on a bien affaire à une argile de prédominance illitique.

VII. — PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET CHIMIQUES DES SOLS DE L'ORAIN

A. — *Propriétés physiques*

1) *Stabilité structurale et perméabilité* (Analyses, tableau 1 en annexe).

Les résultats varient avec la profondeur des couches examinées ; les zones superficielles 0-10 cm, possèdent, en raison de la haute teneur en matières organiques, une remarquable stabilité structurale (Is) et un coefficient de perméabilité (K) très élevé, à l'exception de l'extrême zone Amont, au lieu-dit les Petits Prés (profil n° 20). Ces coefficients demeurent très bons entre 15 et 50 cm. Entre 50 et 80 cm, Is augmente et K diminue, traduisant un état structural moins favorable, mais encore correct. Au delà, pour la zone marmorisée, Is est compris entre 1,64 et 4,13, cette dernière valeur témoignant d'une très mauvaise stabilité structurale. Par contre, le coefficient de perméabilité est très faible, reflétant la compacité exagérée des couches profondes. L'instabilité structurale de ces zones pouvait être décelée sur le terrain en novembre où, après ouverture des fosses, des pans entiers s'effondraient avec facilité.

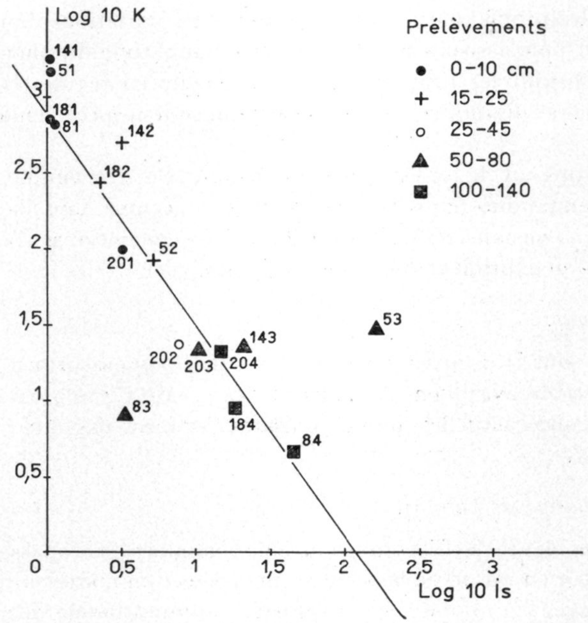
A l'exemple de S. HENIN et de ses collaborateurs (1960), il est possible de donner une représentation graphique des résultats en portant en abscisses les valeurs log. 10 Is et en ordonnées log. 10 K (graphique 7). On constate alors un groupement des points correspondant aux diverses profondeurs des prélèvements : les horizons de surface se concentrent le long de l'axe y comme les sols humifères acides ; la zone

15-25 cm possède des caractéristiques physiques assez semblables à celles des rendzines ; la couche 50-80 cm par contre est très variable, comme en témoigne la dispersion des points ; enfin les horizons profonds se classent parmi les mauvaises terres argileuses d'Europe.

La plus grande partie des points se groupent le long de la droite moyenne d'équation suivante :

$$3 \log 10 \text{ K} + 4{,}2 \log 10 \text{ Is} - 8{,}6 = 0.$$

Cette droite est assez voisine de celle de S. HENIN, établie à la suite d'une cinquantaine d'observations en surface (3 log 10 K + 2,5 log 10 Is — 7,5 = 0), et de celle que l'un de nous (MERIAUX, 1958 *a*) a trouvé sur 93 échantillons de sols et sous-sols variés de Bourgogne (3 log 10 K + 2,5 log 10 Is — 8,1 = 0).



GRAPHIQUE VII. — Vallée de l'Orain-Grozonne. Stabilité Structurale et Perméabilité.

2) *Humidité équivalente* (He) — (Analyses, tableau 1 en annexe).

Les horizons de surface, riches en matière organique, ont une humidité équivalente très élevée, voisine de 60 p. 100 de la matière sèche. La valeur de cette caractéristique décroît avec la profondeur, mais demeure toujours élevée en raison de la finesse des particules.

En prenant arbitrairement comme point de flétrissement les 2/3 de la capacité de rétention, on peut estimer une réserve du sol de l'ordre de 200 mm pour une profondeur de 80 cm. Mais cette quantité est théorique car les racines atteignent très difficilement les couches profondes en raison de leur extrême compacité.

B) *Analyses chimiques* (Tableau 2 en annexe)

1) *pH.*

Tous ces sols sont acides en surface, le pH oscillant entre 5,6 et 6,5 avec une moyenne voisine de 6. Dans tous les profils, sa valeur augmente avec la profondeur où elle atteint 7, et parfois 7,5.

2) *Fer libre.*

Il a été dosé sur 5 profils. De façon générale, les teneurs en fer libre des sols de la vallée de l'Orain sont très élevées. Ces résultats ne surprennent d'ailleurs pas, car l'observation de quelques échantillons de sables à la loupe binoculaire a clairement montré la présence de particules de quartz enrobées d'un ciment ferrugineux.

Si les analyses granulométriques n'ont pas mis en évidence des mouvements d'argile le long des profils, par contre on observe des variations dans les taux de fer libre, notamment pour les sols n° 6-8-18 et 20. L'amplitude du phénomène peut être mesurée en établissant les rapports entre les teneurs en fer des horizons profonds (zone marmorisée) et des horizons superficiels, qui sont respectivement : 1,4-1,2-,1,3-1,3.

Dans le cas présent, le fer est engagé dans un cycle très complexe : il est soumis à un lessivage temporaire dans la zone g_1 ; il se concentre dans la couche gleyifiée G et migre par ascensum en A_2G où il donne des concrétions. C'est la résultante de ces processus qu'expriment les indices calculés.

3) *Azote organique.*

Les teneurs sont très fortes, de 4,75 à 8,45 p. 1 000 en surface, à l'exception du n° 20 qui en contient sensiblement moins (2,7 p. 1 000). Cette grosse réserve d'azote est liée aux difficultés actuelles de minéralisation et n'est pas directement utilisable par les végétaux.

4) *Capacité d'échange de cations.*

Elle est très élevée le long des 5 profils examinés et dépasse dans deux cas 50 m. e. pour 100 g en raison de la richesse en argile et en matière organique . Toutefois, elle décroît avec la profondeur, par suite de la diminution de la fraction organique des sols.

5) *Bases échangeables.*

Ca. — Bien que ces sols ne soient pas calcaires, le calcium est très abondant : 40,8 m. e. pour 100 g comme moyenne des 5 profils (n° 6-8-14-18-20) et constitue toujours une fraction importante de la capacité d'échange : 84 à 93 p. 100.

Mg. — La teneur des sols en cet élément varie de 2,9 à 6 m. e. pour 100 g, ce qui représente des teneurs relativement élevées, soit 8 p. 100 environ de la capacité totale d'échange.

K. — De façon générale, les sols de l'Orain sont pauvres en K, puisque cet élément ne représente que 1,1 p. 100 de la capacité d'échange.

Na. — Le niveau sodique par contre est relativement élevé ; il est supérieur à celui du potassium et atteint 1,14 p. 100 de la capacité d'échange.

VIII. — Aspect de la végétation. Observation du 16 juin 1961

9 relevés floristiques exécutés dans les parties centrale et septentrionale de la région permettent de se faire une opinion sur la valeur actuelle des prairies. Dans son ensemble, la flore est mauvaise, très dégradée et les bonnes espèces sont pratiquement absentes. La composition botanique notée en trois points de la vallée est la suivante :

Profil n° 7 (*)	*Profil n° 8*	*Profil n° 16*
Trèfle des prés	Trèfle des prés	Fétuque des prés
Minette	Minette	Fétuque roseau
Fétuque des prés	Fétuque roseau	Crételle
Fétuque rouge	Houlque laineuse	Renoncule âcre
Houlque laineuse	Crételle	Renoncule rampante
Agrostis alba	*Agrostis alba*	Centaurée (nettement dominante)
Agrostis canina	*Agrostis canina*	*Lychnis flos-coculi*
Renoncule âcre	Brome mou	
Centaurée jacée	Joncs	
Renoncule bulbeuse	Renoncule rampante	
Leucanthème	Renoncule bulbeuse	
Colchique	*Myosotis hispida*	
Myosotis hispida	Séneçon jacobé	
Pissenlit	Pissenlit	
	Centaurée	
	Plantain lancéolé	
	Œnante des marais	

(*) (près du confluent Orain-Grozonne).

IX. — Caractéristiques générales des sols de la vallée de l'Orain et de la Grozonne et différences entre les zones Amont et Aval

Compte tenu de leur état physique actuel, les sols de la vallée de l'Orain et de la Grozonne sont très défavorables au développement normal d'une bonne prairie. Le milieu est fortement asphyxiant en saison humide, de sorte que les racines ne se rencontrent que dans la zone la plus superficielle, alors que les zones à pseudogley ne sont que peu explorées. En période sèche, au contraire, le plan d'eau s'abaisse, des fentes de retrait naissent au sein du sol par suite de la dessiccation des argiles ; le pseudogley devient une zone dure, impropre au développement des racines.

Si ces données sont valables pour l'ensemble de la région, quelques traits particuliers distinguent les sols de la partie aval et de la partie centrale (Villers-les-Bois, Oussières, Biefmorin) de ceux de la partie amont (Colonne). Cette dernière est réputée moins mauvaise par les agriculteurs pour les raisons suivantes :

1° A Colonne, la profondeur du sol, exploré par les racines est légèrement supérieure, ce caractère étant essentiel pour la fertilité.

2° La texture est un peu moins compacte qu'à Villers-les-Bois, Biefmorin.

3° Le pseudogley g_1 est moins superficiel ; il a été observé à partir de 25-30 cm au lieu de 15 cm dans la zone aval.

4° Enfin le ressuyage du sol s'y effectue plus rapidement, et cela en relation avec les conditions topographiques.

X. — Amélioration des sols

1) *Assainissement*

L'abaissement du plan d'eau pourra être envisagé par approfondissement, curage et éventuellement rectification du lit des 3 émissaires principaux : l'Orain, la Grozonne et la Morte des Favières, envahis à l'heure actuelle par une importante végétation qui ralentit encore l'écoulement des eaux. Cet aménagement semble primordial, comme le prouve la présence de la nappe à 90 cm le 16 juin 1961 dans la partie centrale de la zone. Toutefois, ce plan d'eau sera maintenu à un niveau convenable, de façon à assurer aux plantes une alimentation satisfaisante en période de sécheresse prolongée. R. Darpoux (1961), à la suite de résultats expérimentaux, a insisté tout particulièrement sur ce point dans une étude de l'assainissement des « Marais » de la Limagne.

Il existe en outre un grand nombre de petits fossés abandonnés qui pourraient être repris et entretenus et faciliteraient une évacuation de l'eau superficielle qui s'infiltre très difficilement dans ces sols argileux.

La possibilité d'un drainage-taupe pourrait être envisagée, car la stabilité structurale est suffisante, de 0 à 50 cm, mais défectueuse en dessous de cette couche. Il conviendrait dans ce cas d'opérer dans des conditions de ressuyage optimum du sol, d'assurer aux galeries une pente suffisante et un débouché, même en saison humide (nécessité d'abaissement du plan d'eau).

2) *Techniques culturales*

La présence à 15-25 cm d'une couche particulièrement compacte, sera, même après drainage, un obstacle à la pénétration des racines en profondeur. Compte tenu de ses caractéristiques de stabilité structurale, elle semble justiciable d'un ameublissement durable. A cet effet, il serait utile qu'un essai de sous-solage réalisé à 20-25 cm, par temps opportun, soit tenté. Le succès éventuel de cette entreprise pourrait en autoriser la généralisation à l'ensemble du périmètre.

La réserve d'azote organique sera utilisée avec profit par un labour avec chaulage à l'aide de 3 tonnes de calcaire broyé par hectare. Le retournement ne peut porter préjudice aux exploitants, car la prairie naturelle est particulièrement dégradée. Quelques années de culture seront pratiquées avec apport d'engrais phosphopotassiques et ultérieurement un semis de prairie avec des espèces fourragères adaptées pourra être effectué.

L'amélioration de la vallée de l'Orain-Grozonne apparaît donc possible, et la mise en œuvre d'aussi gros travaux d'assainissement parfaitement justifiée.

Reçu pour publication en septembre 1961.

SUMMARY

STUDY OF THE SOILS OF THE ORAIN VALLEY AND OF THE GROZONNE

The poorly drained lower region of the Orain Valley and of the Grozonne comprises soils of rather complex profiles, due to the superposition of hydromorphic pseudo-gleys over gleys. These soils are very rich in clay, and only minute amounts of the fraction greater than 50 μ occur in them.

The clay fraction, investigated by X-ray and chemical analysis and surface measurements, is similar throughout the region and appears to be related to the illite family.

The structural stability of the soils is highly satisfactory down to 50 cm depth, due to the high levels of organic matter ; the stability markedly deteriorates at greater depths.

The soils of the valley are acid, and their cation-exchange capacity and exchangeable — Ca content are very high.

The improvement of these soils may be achieved by decreasing the watertable, maintaining a system of trenches, ultimately rectifying the bed of the three main water collectors and, possibly, applying mole drainage.

Cultural techniques should tend to loosen the very compact 15-25 cm layer, and rational fertilifing should accompany these measures.

ZUSAMMENFASSUNG

Die schelcht drainierten Niederungen der Orain und Grozonne-Täler (Jura), bestehen aus Böden mit ziemlich komplexen Profilen, durch überschichtung eines Pseudogleys mit Oberflächen-hydromorphie und eines tiefen Gleys entstanden. Diese Böden sind äusserst tonhaltig, und die über 50 μ grossen Teilchen machen nur einen unbedeutenden Teil aus.

Der durch Röntgenstrahlen, Oberflächenmessung und chemische Analyse untersuchte Tonanteil ist der gleiche auf der ganzen Ausdehnung der untersuchten Zone und scheint zur Familie der Illiten zu gehören.

Die Strukturstabilität dieser Böden ist infolge der reichlichen organischen Substanz bis zu 50 cm sehr zufriedenstellend ; darunter wird sie hingegen bedeutend schlechter.

Die Böden dieses Tals sind sauer ; ihr Kationenaustauschvermögen ist sehr hoch, desgleichen ihr Gehalt an austauschbarem Ca.

Ihre Verbesserung ist durch ein Absinken des Wasserspiegels, den Unterhalt der Gräben und durch eine eventuelle Berichtigung des Betts der drei Hauptsampeldrains durchaus möglich. Auch eine Maulwurfsdrainage könnte dazu beitragen.

Die späteren technischen Kulturmassnahmen zielen auf eine Lockerung der sehr kompakten 15-25 cm-Schicht. Eine rationnelle Düngung muss alsdann diese Arbeiten ergänzen.

Изучение почв долины Орэна и Грозонны.

М. ДЕЖУ и МЕНО (Дижон).

Низинный и плохо осушенный район долины рек Орэна и Грозонны (Юра) состоит из почв со сложными профилями вызванными чередованием слоев псевдо-глея с поверхностной гидроморфией, и глубокого глея. Эти почвы чрезвычайно богаты глиной, и частицы превышающие 50 микронов составляют лишь ничтожную часть матерьяла.

Глинистая часть, изученная при помощи рентгеновских лучей, измерений поверхностей и химических анализов, оказалась одинаковой на всем протяжении исследованной зоны и должна принадлежать к семейству иллитов.

Водопрочность структуры этих почв весьма удовлетворительна до глубины в 50 см в виду обилия органического вещества; глубже, напротив, она делается явно плохой.

Почвы этой долины дают кислую реакцию; емкость их обмена катионами очень повышена, так-же как и количество содержащейся в них обменной извести.

Их улучшение может быть достигнуто при помощи понижения уровня грунтовых вод, ухода за рвами а так-же исправления русла трех главных коллекторов. Улучшения этого возможно тоже добиться проведением крот-дренажа.

Последующие агротехнические приемы должны будут быть направлены на разрыхление 15-ти-25-ти сантиметрового слоя. Рациональные удобрения дополнят реализацию этих работ.

TABLEAU I

Analyses granulométriques et physiques

Profils de la vallée de l'Orain-Grozonne

Échantillons	Profondeur (en cm)	pH	Analyses granulométriques (% du total minéral)					H_2O % de la terre séchée à l'air	Mat. org. C × 1,75 %	Mat. org. (perte au feu %)	Is	K cm/heure	He % de la M. S.
			Argile < 2 µ	Limon 2-20 µ	Sables très fins 20-50 µ	Sables fins 50-200 µ	Sables grossiers 200-2 000 µ						
11	0-7	5,9	79,0	19,5	0,5	0,0	1,0	6,0	17,7	13,8			
12	7-15	6,2	80,5	17,5	1,0	0,0	1,0	6,5		6,32			
13	20-35	6,8	72,0	22,0	3,0	2,0	1,0	6,0		2,64			
14	50-60	7,0	90,5	5,5	2,0	1,5	0,5	6,4		—			
15	70-90	7,3	61,0	28,6	6,4	2,0	2,0	5,7		1,1			
16	140-150	7,4	65,0	23,0	7,0	3,0	2,0	4,4		—			
21	0-10	6,0	86,5	10,5	1,0	1,0	1,0	6,8	19,7	15,2			
22	10-20	6,2	80,5	15,0	2,5	1,8	0,2	5,85		6,8			
23	25-40	6,7	81,5	14,0	2,5	1,8	0,2	5,7		0,6			
24	50-70	7,0	66,0	24,0	5,5	3,0	1,5	5,6		—			
25	90-110	7,2	47,0	27,5	14,5	7,5	3,5	4,0		—			
31	0-8	5,9	78,5	17,0	3,0	1,3	0,2	8,0	19,2	16,1			
32	10-22	6,4	83,0	14,0	2,0	0,8	0,2	5,7		3,2			
33	30-50	7,2	77,5	16,5	4,0	1,5	0,5	6,5		—			
34	50-75	7,5	54,0	31,5	8,0	4,5	2,0	5,1		—			
41	0-20	6,1	72,5	18,5	5,0	3,5	0,5	7,0	13,25	9,85			
42	20-40	6,2	68,0	22,0	5,5	2,0	2,5	5,9		1,65			
43	40-55	6,2	64,0	23,0	7,5	3,5	2,0	5,1		0,65			
44	60-80	6,8	61,0	26,5	6,5	2,0	2,0	4,5		—			
45	100-110		57,5	29,5	9,0	2,5	1,5						
51	0-12	6,2	80,0	16,5	2,0	1,5	0,0	7,1	16,6	12,2	0,07	158	61,1
52	15-25	6,8	81,0	15,5	2,5	0,8	0,2	6,3		2,7	0,50	8,6	50,0
53	50-70	7,3	76,0	19,0	2,0	2,0	1,0	6,3		—	1,52	3,2	44,7
54	80-85		64,0	24,0	7,5	3,0	1,5						
61	0-10	6,2	72,0	23,0	2,0	1,8	0,2	5,9	15,6	14,55			
62	10-20	6,7	68,0	24,0	6,0	1,8	0,2	7,5	7,45	4,0			
63	45-65	7,3	70,5	22,0	3,5	2,0	2,0	5,4	1,38	0,5			
71	0-8	6,2	69,5	23,9	4,1	1,5	1,0	6,9	15,07	12,6			
72	20-40	6,6	72,5	22,5	2,5	2,3	0,2	6,0		3,5			
73	50-70	6,9	65,0	28,0	4,0	1,0	2,0	5,2		1,7			
81	0-15	6,0	79	16,5	2,0	2,5	0,0	7,6	15,6	11,4	0,12	73	58,4
82	15-21	6,2	80,5	17,5	1,0	1,0	0,0	7,0	6,0	4,7	0,14		
83	50-70	7,0	50	34,0	9,0	4,5	2,5	4,0	2,4	1,7	0,31	0,8	31,7
84	100-120	7,3	46	34,5	12,0	5,0	2,5	3,4	0,86	0,35	4,13	0,5	31,2

91	0-15	6,2	79,5	15,0	2,5	2,8	0,2	7,6	11,43	11,05			
92	15-21	6,5	78,5	17,0	2,5	1,5	0,5	7,0		3,5			
93	40-60	6,9	62,5	27,5	6,5	2,0	1,5	5,5		0,6			
94	100-120	7,0	60,5	28,5	5,0	3,5	2,5	5,2		—			
101	0-5	5,4	75,4	21,6	1,9	0,8	0,3	7,0	15,6	9,8			
102	5-15	5,3	92,5	6,2	0,0	0,8	0,5	6,2		5,75			
103	40-60	6,8	75,5	21,2	1,1	1,1	1,1	6,0		0,1			
104	100-120	7,3	67,4	21,7	5,4	2,3	3,2	5,7		—			
111	0-8	5,6	47,4	33,4	11,5	6,1	1,6	5,0	13,5	9,8			
112	8-32	5,4	52,0	25,4	7,5	11,2	3,9	4,0		4,05			
113	40-60	6,6	57,7	23,1	9,9	5,8	3,5	3,65		—			
114	80-110	7,1	53,2	26,2	11,5	6,8	2,3	3,90		—			
121	0-10	6,1	82,5	12,5	3,5	1,0	0,5	7,7	15,6	11,9			
122	10-20	6,5	84,0	14,5	0,5	1,0	0,0	7,4		2,2			
123	40-60	7,1	69,5	22,0	5,0	2,0	1,5	5,9		—			
124	70-90	7,4	59,0	25,0	9,5	4,5	2,0	4,4		—			
131	0-15	6,0	81,5	16,5	0	1,5	0,5	7,1	14,0	11,65			
132	20-35	6,9	81,5	15,5	1	1,0	1,0	6,8		—			
133	60-85	7,5	64,0	24,0	10,5	0,5	1,0	5,0		—			
134	90-110		61,0	23,5	10,5	2,5	2,5						
141	0-8	6,2	67,5	29,0	2,5	0,5	0,5	6,5	17,15	13,6	0,08	171	60,0
142	8-23	6,2	73,0	22,0	3,5	1,3	0,2	5,8	5,9	1,95	0,30	53	
143	50-75	6,8	76,5	19,0	1,5	1,0	2,0	6,1	1,4	—	1,89	2,4	
151	0-15	5,6	52,5	27,5	11,0	8,5	0,5	5,0	13,0	10,95			
152	15-25	5,7	48	29,0	10,5	9,0	3,5	4,5		4,75			
153	35-45	6,0	51,5	27,0	11,0	7,0	3,5	4,3		1,55			
154	65-85	6,7	69,0	24,0	5,5	1,0	0,5	5,7		0,25			
161	0-20	6,5	65,0	24,6	6,7	3,1	0,6	6,0	13,0	8,15			
162	20-30	7,0	69,5	23,5	4,3	2,1	0,6	5,5		2,65			
163	50-80	7,6	65,0	30,5	2,5	1,8	0,2	5,3		0,70			
171	0-9	5,8	72,5	21,0	4,0	1,5	1,0	6,8	14,5	12,65			
172	9-20	5,8	69,0	25,0	3,0	2,0	1,0	6,4		5,20			
173	50-70	6,4	71,0	24,5	3,0	1,0	0,5	5,9		0,30			
174	110-130	6,8	70,0	24,5	2,0	1,5	2,0	5,9		—			
181	0-10	5,8	77,0	20,5	0,0	2,0	0,5	7,5	19,2	14,4	0,09	63,7	61,1
182	10-20	6,2	77,0	20,5	0,0	2,0	0,5	6,7	7,3	6,0	0,22	25,6	
183	50-70	6,8	76,5	20,0	1,5	1,0	1,0	6,0	2,8	0,65		1,9	
184	110-140	7,1	64,0	27,5	4,0	1,5	3,0	5,5	1,7	—	1,83		
191	0-17	6,1	56,5	25,5	11,5	6,0	0,5	4,65	8,83	6,85			
192	17-27	7,3	52,0	27,5	12,5	6,25	0,75	4,20		3,10			
193	50-70	7,7	62,5	27,0	5,5	4,75	0,25	5,05		1,15			
194	110-130	7,4	60,0	23,5	7,5	7,0	2,0	4,9		—			
201	0-20	6,2	60,5	22,0	13,0	4,0	0,5	4,45	7,3	3,20	0,32	9,9	
202	25-45	6,7	52,5	27,5	14,5	4,5	1,0	4,05	2,07	0,20	0,72	2,4	
203	60-80	7,0	62,0	31,0	2,0	4,4	0,6	4,9	2,25	—	1,07	2,3	
204	110-130	7,4	64,5	22,0	8,5	4,3	0,7	5,25	0,69	—	1,64	2,2	

TABLEAU 2

Analyses chimiques

Profils de la vallée de l'Orain et de la Grozonne

Échantillon	Profondeur (en cm)	C ‰	N ‰	C/N	Capacité d'échange en m.e. %	Bases échangeables en m.e. %				Fe ‰
						Ca	Mg	K	Na	
11	0-7	101,0	7,75	13,0						
12	0-10	112,85	7,70	14,6						
31	0-8	109,9	8,45	13,0						
41	0-20	75,6	5,45	13,9						
51	0-12	95,05	7,15	13,3						
61	0-10	89,1	7,8	11,4	48,6	44,75	4,25	0,46	0,53	61,25
62	10-20	42,57	4,17	10,2	36,9	37,75	3,75	0,32	0,34	77,5
63	45-65	7,92	1,05	7,54	35,4	36,0	5,00	0,40	0,41	85,0
71	0-8	86,13	6,45	13,3						
81	0-15	89,1	6,50	13,7	52,4	44,25	3,75	0,31	0,40	66
82	15-21	34,65	3,50	9,9	42,15	42	3,5	0,25	0,23	72,5
83	50-70	13,85	1,25	11,1	25,10	24,5	3,5	0,13	0,18	65,5
84	100-120	5,95	0,95	6,25	19,82	18,5	2,0	0,11	0,17	79,5
91	0-15	65,34	6,10	10,7						
101	0-5	89,10	7,50	11,9						
111	0-8	77,22	6,20	12,45						
121	0-10	89,1	7,50	11,9						
131	0-15	80,2	5,50	14,5						
141	0-8	98,0	7,15	13,7	44,80	39,0	6,0	0,60	0,64	72,5
142	8-23	33,66	3,45	9,75	36,17	31,75	5,35	0,43	0,35	74,5
143	50-75	7,92	1,65	4,80	33,65	32,0	6,0	0,40	0,34	72,5
151	0-15	74,25	5,55	13,4						
161	0-20	74,2	4,75	15,6						
171	0-9	83,15	5,80	14,25						
181	0-10	109,9	7,90	13,9	50,30	46,1	2,9	0,60	0,53	64,5
182	10-20	41,6	4,25	9,8	42,05	41,75	3,12	0,45	0,37	70,0
183	50-70	15,9	1,70	9,37	34,8	36,5	3,75	0,43	0,30	75,5
184	110-140	9,9	0,90	11,0	28,25	28,5	4,8	0,39	0,32	82,0
191	0-17	50,5	4,80	10,5						
201	0-20	41,6	2,70	15,4	29,65	30,5	3,5	0,39	0,42	53,5
202	25-45	11,9	1,60	7,4	25,50	26,25	1,25	0,40	0,32	60,0
203	60-80	12,87	1,30	9,9	27,60	28	3,0	0,44	0,34	67,0
204	110-130	3,96	0,95	4,16	28,75	33,5	2,0	0,46	0,31	71,5

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BASTISSE E. M., 1947. Contribution à la détermination du type minéralogique des argiles des sédiments. Sols naturels en place et terres de culture. *Ann. Agron.*, 398-453.

CHAUSSIDON J., 1961. Étude de l'environnement ionique et des propriétés électrochimiques de surface des particules d'argile en suspension. Thèse, 15-26.

DARPOUX R., 1961. Essai sur l'intérêt économique de l'assainissement des « Marais » de Limagne. *B. T. I. V.* **159**, 411-424.

DUCHAUFOUR P., 1960. Cours de Pédologie, Nancy.

FRIPIAT J. J., GASTUCHE M. C., 1952. Étude physico-chimique des surfaces des argiles. *INEAC. Sér. sci.*, n° 54,

GRIM R. E., 1953. Clay Minerology. McGraw Series in Geology.

HENIN S., FEODOROFF F., et coll., 1960. Le profil cultural. Principes de physique du sol. *Soc. Ed. des Ing. Agron.*, Paris.

LAPADU-HARGUES P., 1957. Méthodes d'analyses des roches et minéraux des roches. *Trav. Lab. Géol. Minéral. Fac. Sci.*, Clermont-Ferrand. Sér. Doc. n° 7.

MERIAUX S., 1958 (*a*). Stabilité structurale et composition des sols. *C. R. Acad. Agric.*, 799-803.

MERIAUX S., 1958 (*b*). Considérations pédologiques et agronomiques sur le Val-de-Saône. *Ann. Agron.*, 593-636.

MILLOT G., 1949. Relation entre la constitution et la genèse des roches sédimentaires argileuses (Thèse). *Extrait de Géologie appliquée et prospection minière de Nancy*, **2**, 371.

NELSON R. A., HENDRICKS S. B., 1944. Specific surface of some clay minerals — Soils and Soil Colloids. *Soil Soc.*, **56**, 285-296.

Ann. agron., 1961, **12** (5), 513-548.

631 473 (44)

LES SOLS ET L'AGRICULTURE DANS LES ALLUVIONS ANCIENNES ET MODERNES DE LA RÉGION DE LILLEBONNE (VALLÉE DE BASSE-SEINE)

E. JOUIS et Marie-Thérèse LECACHEUX
Avec la collaboration technique de Françoise MORTAIN
Sation agronomique, Rouen (Seine-Maritime).

SOMMAIRE

Ce mémoire est le deuxième d'une série destinée à mettre en évidence les textures des sols des différents terroirs de la vallée de Basse-Seine entre Rouen et l'estuaire ; à faire ressortir leurs qualités physico-chimiques et à mettre ces résultats en rapport avec les vocations agronomiques anciennes et nouvelles des régions étudiées.

La région de Lillebonne comporte une petite partie de terrain sur alluvions anciennes sablo-caillouteuses, antéwurmiens, s'étageant au bas du plateau crayeux cauchois, et une vaste surface plane d'alluvions modernes calcaires de remblayage post-wurmien de la vallée de Seine. On distingue trois degrés d'ancienneté. Les terrains les plus récents et les plus étendus ont été artificiellement créés par l'endiguement du fleuve peu après 1850.

La méthode utilisée a consisté à relever des séries de profils d'environ 1,25 m sur des lignes perpendiculaires à la Seine, savoir : A par Saint-Maurice-d'Ételan ; B par Petiville ; C par Saint-Jean de Folleville.

Six ou sept couches ont été analysées dans chaque profil au point de vue granulométrique et des comparaisons ont été effectuées à l'aide d'un indice des spectres sableux. En outre des déterminations physico-chimiques classiques ont été effectuées sur le sol et le premier sous-sol.

Le mémoire se termine par un court historique sur l'évolution agronomique des terrains étudiés, sur leur utilisation actuelle et sur leur avenir.

INTRODUCTION

Dans une première étude sur les terroirs de la vallée de Basse-Seine, nous avons décrit les terrains que l'on rencontre sur la rive gauche, dans un méandre typique de la Basse-Seine, celui dont la ville de Duclair occupe, au nord, le sommet.

Nous en avons profité pour donner des informations historiques et actuelles sur les cultures en vallée de Basse-Seine en général et sur celles du méandre de Duclair en particulier.

Dans cette seconde étude, nous décrirons les sols que l'on trouve près de l'embouchure du fleuve, sur la rive droite du premier méandre se dessinant après l'estuaire.

MÉTHODES GÉNÉRALES

Comme pour le méandre de Duclair, nous avons utilisé des « traversées » complètes depuis le fleuve jusqu'aux terrains d'alluvions anciennes sur les terrasses éloignées.

Le long de chaque traversée, nous avons prélevé des profils à l'aide d'une grosse sonde, jusqu'à environ 1,25 m chaque fois que cela était possible. Les sondages étaient faits pour chaque sol paraissant différent du précédent, et les intervalles ont varié entre 100 et 600 m.

Dans chaque profil complet nous avons effectué des analyses granulométriques et physiques, s'étendant parfois jusqu'à 9 zones. Les analyses granulométriques, assez poussées, ont permis de définir les « spectres sableux » aux différentes profondeurs, spectres que nous représentons par un index « lettré » facilitant les comparaisons.

Deux traversées sont très complètes, à l'ouest (Saint-Mauriced-Etelan = A) et à l'est (Petitville = B) du méandre que l'on peut désigner sous le nom « méandre de Vieux Port », cette localité en occupant le sommet au Sud.

Une traversée partielle = C a été effectuée près de Tancarville sur les alluvions de la commune de Saint-Jean-de-Folleville.

Dans le même temps nous avons étudié les cultures pratiquées sur les alluvions anciennes et modernes de cette région et nous y avons aussi implanté quelques champs expérimentaux. Cela nous permettra de relier les natures de sols aux possibilités culturales de ce terroir.

GÉNÉRALITÉS SUR LE MÉANDRE DU VIEUX-PORT

Si l'on examine la coupe de la vallée majeure dressée par Apel, en 1906, d'après des sondages effectués vers 1900 pour la Compagnie des Chemins de fer de l'Ouest sur le territoire de Petitville, on constate que le cours principal de la Seine n'a pas dû s'écarter sensiblement du cours actuel, tel qu'il a été fixé par les travaux d'endiguement et d'approfondissement des Ponts et Chaussées il y a un peu plus d'un siècle. En effet, les couches superposées de tourbe profonde occupent toute la largeur du lit majeur sauf aux abords immédiats du cours actuel.

Par contre, l'intercalation de sédiments alluvionnaires entre les couches tourbeuses montre que la totalité du lit majeur fut périodiquement envahie par les eaux du fleuve au cours de son exhaussement.

Le dernier dépôt est le plus épais. Il constitue les alluvions modernes sur lesquelles sont installées prairies et cultures de la vallée.

D'après le diagramme d'Apel ce dépôt de surface atteint 10 à 12 m pendant environ 500 m à partir de la berge actuelle, mais se réduit progressivement quoique irrégulièrement à 3 m au contact du talus portant la commune de Petitville.

Il est bien certain que ces épaisses alluvions modernes ont mis un certain temps à se déposer tout en subissant des remaniements en bien des points, au hasard des divagations de nombreux bras peu profonds de la Seine préhistorique.

Le colmatage définitif, assez rapide, est le fait de l'endiguement qui en cette région, date de 1853. (Au début : digue submersible).

Précédemment, des colmatages partiels avaient été obtenus par des digues moins avancées dont on retrouve la trace sur le terrain et que l'on peut cartographier assez exactement.

En ce qui concerne la coupe nº 1 d'Apel perpendiculaire à la Seine près du point km 328,5 et passant à l'ouest de l'église de Petitville, une première digue antérieure à 1770 se trouvait à environ 1 600 mètres de la berge actuelle, le long de la route départementale D 81.

Une seconde digue établie sans doute vers 1710 n'était plus qu'à environ 1 350 mètres. Elle retient les alluvions déposées entre 1710 et 1834. Sa limite coïncide avec le chemin dénommé « La Chaussée » sur la carte au 1/20 000 Pont-Audemer nº 3-4.

Le reste des alluvions fut consolidé surtout à partir de 1835 ainsi que nous l'avons précédemment expliqué.

Plus à l'ouest, et en particulier dans notre traversée B, on ne rencontre pas d'anciennes digues entre la berge actuelle et le talus sauf tout près de ce dernier.

Plus à l'est et notamment au sommet sud du méandre (cale du Vieux Port) la première digue antérieure à 1710 atteint presque la berge actuelle (200 m) ce qui réduit à peu de chose les alluvions intermédiaires.

Encore plus à l'est et notamment au niveau de notre traversée A de Saint-Maurice-d'Ételan, les anciennes digues sont à nouveau nettement séparées et sensiblement parallèles à la Seine. On trouve l'ancienne rive de 1834 à environ 400 m et l'ancienne rive de 1710 à environ 800 m.

Tous ces terrains sont très plats, mis à part les fossés. L'altitude générale est d'environ 4 m NGF. Toutefois, il existe des points bas, pouvant descendre à 3 m NGF, qui risquent naturellement d'être ennoyés en cas de grandes marées ou de pluies hivernales persistantes. Les chemins modernes, notamment sur les berges, sont remblayés à 5 mètres.

Sur la rive droite, entre Villequier et Tancarville, on compte environ 4 200 hectares d'alluvions modernes, se répartissant comme suit :

2 000 ha endigués ou stabilisés avant 1710 ;

400 ha endigués ou stabilisés entre 1710 et 1834 ;

1 800 ha endigués après 1834.

Sur les 2 000 ha existants avant 1710 environ 650 se trouvent le long des falaises mortes, de Tancarville à Petitville. Le reste, soit 1 350 ha, forme une grande surface entre Petitville et le début de Villequier.

Inversement, la plus grande surface des alluvions très récentes, après 1834, se trouve dans l'anse de Lillebonne, entre le pont de Tancarville et le bac pour piétons de Vieux Port, environ 1 600 ha sur 1 800.

La vocation première de ces terrains gagnés sur les divagations des eaux fut la prairie naturelle. Depuis quelques décades, des surfaces croissantes sont mises en culture, posant de nouveaux problèmes à l'agronome et rendant leur étude détaillée encore plus utile.

Les alluvions anciennes, y compris les dépôts plus ou moins soliflués, occupent dans la région étudiée, environ 1 500 ha entre les mêmes limites, non compris la vallée de Lillebonne.

Sur ce total, une bonne partie supporte les communes de Norville, Saint-Maurice-d'Ételan, Petitville. Notre Dame et Saint-Georges-de-Gravenchon, ainsi qu'une fraction de Lillebonne.

Entre Lillebonne et Tancarville, les alluvions anciennes sont pratiquement inexistantes en surface, mais n'oublions pas qu'elles sont présentes en profondeur de même que pour tout le Marais.

TRAVERSÉE A. (ST MAURICE D'ÉTELAN)

Cette traversée comprend 11 profils dans le « Marais » et 3 profils dans les alluvions anciennes recouvrant le talus crayeux de Saint-Maurice-d'Ételan.

Chaque profil est désigné par un chiffre et une lettre majuscule. Les différentes couches examinées reçoivent une lettre minuscule : *a*, *b*, *c*, *d*... à partir de la surface et les couches analysées un numéro de recherche R 1491, etc.

Voici la liste des profils de la traversée A, avec les distances à la Seine, les coordonnées LAMBERT, l'altitude NGF de la surface et la période de dépôt pour le marais.

4 A	R 1491/98	120 m	476,900/195,400	±	4 m	1834 et après
4 B	R 1499/1506	270 m	476,840/195,500	+	4 m	—
4 C	R 1507/14	370 m	476,580/195,440	±	4 m	—
7 A	R 1606/14	520 m	476,480/195,640	±	3,50 m	de 1710 à 1834
7 B	R 1615/22	900 m	476,180/195,800	±	3,50 m	avant 1710
7 C	R 1623/30	1 120 m	476,060/195,980	±	3,50 m	—
7 D	R 1631/38	1 410 m	475,880/196,200	±	3,50 m	—
7 E	R 1639/47	1 560 m	475,840/196,370	±	3,50 m	—
8 A	R 1710/16	1 740 m	475,660/196,480	±	3,80 m	—
8 B	R 1717/24	2 060 m	475,480/196,760	±	3,80 m	—
8 C	R 1725/31	2 280 m	475,400/196,920	±	3,80 m	—
8 D	R 1732/35	2 460 m	475,480/197,230	+	25 m	à 160 m du pied du talus
8 E	R 1736/38	2 560 m	475,320/197,240	±	25 m	à 230 m — —
8 F	R 1739/43	2 820 m	475,200/197,480	+	24 m	à 500 m — —

Pour chaque échantillon analysé, nous avons déterminé les cailloux p. 100 de terre brute, avec souvent une division en plusieurs classes : petits graviers de 2 à 5 mm, graviers de 5 à 20 mm, cailloux au-dessus de 20 mm, etc.

Les terres du Marais ne comportent aucun cailloux d'origine ; par contre, les alluvions anciennes sont très caillouteuses, (silex...).

Nous avons ensuite déterminé la granulométrie sur la terre fine par la méthode DEMOLON et BASTISSE (1954) permettant de séparer les sables siliceux des sables calcaires.

Les sables ont été répartis en 6 classes, savoir : 2 - 1 - 0,5 - 0,2 - 0,1 - 0,05 - 0,02 mm, ce qui a permis, grâce à un index « lettré » de faire d'utiles comparaisons entre les profils. On a de plus : les limons siliceux et calcaires, l'argile, la matière organique, le calcaire total, le pH et pour les sols et sous-sols immédiats, l'analyse chimique.

Un certain nombre de profils comportent en outre l'azote total par la méthode Kjeldahl, le carbone par la méthode ANNE (1945) et le fer libre.

Il n'est pas possible de présenter les milliers de résultats obtenus au cours des analyses de tous les profils des traversées de la région de Lillebonne. Nous ne pourrons qu'examiner les caractéristiques globales de chaque profil en les appuyant de quelques chiffres et nous donnerons des tableaux résumant les principales constatations.

Voici les caractéristiques pour la traversée A.

4 A — Ancienne prairie en bordure de Seine, derrière la digue. Actuellement très rarement submergée malgré la mauvaise fermeture des vannes des fossés perpendiculaires à la Seine.

Ce champ est en culture depuis quelques années. Le prélèvement a été fait sur chaumes de colza de printemps.

Le terrain paraît léger (sables calcaires)et s'égoutte facilement. Nombreux prêles.

Il n'y a que des traces de sable grossier (débris de coquilles) mais une grosse masse de sables fins, siliceux et calcaires.

La teneur en sables fins siliceux augmente avec la profondeur, de 58 p. 100 à 82 p. 100 (1,20 m). Les sables fins calcaires, au contraire, diminuent de 12 à 9 p. 100.

Les spectres sableux établissent que suivant les couches 20 à 50 p. 100 des sables siliceux ont de 20 à 50 μ et 45 à 80 p. 100 de 50 à 100 μ mais qu'il y a peu de sables 0,1 - 0,2 mm généralement moins de 3 p. 100 et des traces de sables grossiers 0,2 à 2 mm.

En outre, la grosseur du « sable fin » est plus forte en profondeur qu'en surface (Cf. diagramme).

La catégorie limon est pauvre, environ 6 p. 100 de limon siliceux et 3 p. 100 de limon calcaire en surface contre 3 et 1 p. 100 à 1,20 m.

L'ensemble des analyses des alluvions calcaires a montré qu'à partir d'un certain taux la proportion du limon suit grossièrement celle de l'argile. Par exemple, en moyenne, une augmentation d'argile de 10 p. 100 à 15 p. 100 de la terre fine correspond à une augmentation de 10 p. 100 à 14 p. 100 pour le limon. On peut rendre le nuage de points par une courbe de correspondance approchée qui est la parabole $y = - 0{,}0118\, x^2 + 1{,}09\, x \times + 0{,}424$ où y désigne le limon total (siliceux et calcaire) et x désigne l'argile calcique.

L'argile est faible, 8 à 9 p. 100 en surface mais environ 3 p. 100 en profondeur.

La matière organique passe de 3,4 en surface à 1 p. 100 en profondeur.

Le calcaire total passe de 28 p. 100 à 31 p. 100.

Le pH est de l'ordre de 7,8, augmentant un peu en profondeur.

Le fer libre est compris entre 0,4 et 0,3 p. 100 avec tendance à baisser en profondeur.

4 B — Même parcelle, mais plus éloignée de 150 m. Les caractéristiques sont voisines des précédentes mais avec plus d'argile dans le sol superficiel.

4 C — Même parcelle, mais 100 mètres plus loin et un peu à l'ouest des points A et B. Le spectre sableux siliceux montre qu'il s'agit du même type de sol. Toutefois, cette partie du champ est en légère dépression (quelques décimètres) par rapport aux points précédents, ce qui peut expliquer une quantité d'argile superficielle encore plus forte, atteignant 17,7 p. 100. Un léger colluvionnement a amené, au cours des ans, par exemple au moment du retrait des eaux d'inondation, les particules fines à séjourner et à se déposer dans les légères cuvettes de ce terrain dans l'ensemble remarmarquablement plat.

Corrélativement, on constate un enrichissement superficiel en matières organiques, atteignant 6,7 p. 100 entre 0 et 20 cm et encore de l'ordre de 3 p. 100 à 35 cm.

Enfin, la quantité de calcaire s'abaisse à 23,2 p. 100 en surface, surtout par effet de dilution. En effet, si l'on considère une teneur normale en profondeur, par exemple 29,7 p. 100 à 71 cm pour 1,6 de matière organique, 2,1 d'argile et 66,3 de sables siliceux, on trouve que le rapport des teneurs en calcaire $1{,}28 = 29{,}7/23{,}2$ est voisin du rapport des teneurs en sables siliceux $1{,}49 = 66{,}3/42{,}3$.

7 A — La Seine est à 520 m, et d'après la carte des Ponts et Chaussées, nous avons franchi l'ancienne ligne du rivage de 1834, située à environ 400 m du fleuve actuel.

Le champ était cultivé en blé au moment du profilage.

Les spectres sableux sont nettement différents des précédents. Ils caractérisent

une grande finesse dans tout le profil. Par exemple, à la profondeur moyenne de 34 cm, l'index est wca - xax ce qui veut dire que plus de 95 p. 100 des sables siliceux est dans la classe 20-50 μ et presque tout le reste dans la classe 50-100 μ.

Toutefois, au-dessous de 1 m la classe 50-100 μ augmente au détriment de la classe 20-50-μ.

Par exemple, vers 1,10 m on a l'index nmb - axx, c'est-à-dire 50 à 55 p. 100 dans la classe 20-50 μ, 45 à 50 p. 100 dans la classe 50-100 μ, 1 à 3 p. 100 dans la classe 0,1 - 0,2 mm et moins de 1 p. 100 de sables grossiers de 0,2 à 0,5 mm.

L'argile n'est pas très élevée, environ 10 p. 100 jusqu'à 1 m mais seulement 2 à 4 p. 100 au-dessous.

La matière organique, assez forte en surface, 5,7 p. 100 (anciennes prairies) descend entre 1 à 2 p. 100 en profondeur.

Comme dans tous ces sols finement calcaires, les pH sont élevés, de l'ordre de 7,5 en surface mais 8 en profondeur.

L'azote est proportionnel à la matière organique, et, en moyenne, 20 fois moindre, comme pour les limons du plateau de Caux.

Le carbone, par la méthode Anne, permet de retrouver, en moyenne, le coefficient 1,72 de passage à la matière organique, mais avec un rapport C/N voisin de 10 en surface baissant à 8 et même parfois moins de 7 en profondeur.

7 B — A 900 m de la Seine, toujours dans le champ de blé 1958, ce profil se présente comme le précédent, mais légèrement moins fin. Par exemple, vers 45 cm, l'index est ria - xxx contre vdx - xxx au 7 A. Vers 1,25 m on a koc - axx contre pka - aax. On remarquera combien l'utilisation de l'index lettré est pratique pour déceler tous changements de granulométrie supérieurs aux écarts possibles des dosages.

Les teneurs en argile sont, en moyenne, légèrement inférieures, par exemple 8,8 p. 100 contre 9,4 en surface ; 2,2 contre 3,6 à 1,10 m. Enfin il y a moins de matière organique : 3,4 en surface.

En profondeur, comme d'ailleurs dans tous les profils précédents, on trouve des marbrures ferrugineuses plus ou moins accentuées à partir de 80 cm. On peut d'ailleurs rencontrer un plan d'eau, au printemps (mai) peu au-dessous de 1 m.

Ceci nous indique que si la surface de ces sables calcaires très fins, mais pas très argileux, se draine bien, l'eau reste quand même à proximité pendant une partie de l'année.

Notons encore que, d'après la carte des anciens dépôts d'alluvions, ce profil est le premier dans l'ancien marais antérieur à 1710, la bordure se trouvant en cet endroit à environ 775 m du fleuve actuel.

7 C — A 1 120 m de la Seine, à l'extrémité de la parcelle précédente.

Depuis la Seine, le plan du Marais est très légèrement descendant, et la surface se rapproche ici de + 3 m NGF. D'ailleurs, deux anciennes mares subsistent à proximité de la route. Nous avons trouvé un sol un peu plus noir et un peu plus humide.

L'analyse confirma cette constatation, car l'argile est égale à 17,4 p. 100 en surface, à 19,0 p. 100 vers 30 cm, et 12 p. 100 vers 40 cm, 8,7 p. 100 à 50 cm, mais elle descend à 3 p. 100 vers 90 cm.

La matière organique est entre 4 et 5 p. 100 dans les trente premiers centimètres et reste à 2 p. 100 en profondeur. La granulométrie des sables est très fine, par exemple wba - aax en surface mais devient un peu plus grossière vers 1 m.

On retrouve le phénomène de dilution du calcaire en surface par l'argile et l'humus, ainsi que l'abaissement du pH. On trouve en surface 24,6 p. 100 CO_3 Ca et pH = 7,3. A 50 cm on a 28,7 p. 100 CO_3Ca et pH = 7,8.

Il y a des marbrures dès 40 cm et l'eau suinte dans le trou de sonde à 120 cm.

7 D — A 1 410 m de la Seine. Le profil est prélevé dans un champ de colza en fleurs, moins argileux mais un peu plus humifère en surface. Toujours très fin, même en profondeur. La couche profonde 108-128 cm est un peu fluante par présence d'eau.

7 E — A 1 560 m de la Seine. Dans une bonne prairie pâturée. Quelques dizaines de mètres après avoir franchi le petit ruisseau : le Hannetot.

L'altitude peut toujours être évaluée à ± 3,50 m NFG. Le sol est extrêmement fin et uniforme jusqu'à plus d'un mètre, avec un index lettré voisin de wca - xxx, c'est-à-dire plus de 95 p. 100 de sables 20-50 μ et moins de 5 p. 100 de sables 50-100 μ. Aucune trace de sables grossiers.

L'argile est de l'ordre de 10 à 12 p. 100 même en profondeur. La matière organique est naturellement abondante en surface ou elle atteint 7,6 p. 100 dans les 12 premiers centimètres, mais elle est faible en profondeur : 1 à 2 p. 100.

8 A — Seine à 1 740 m. A l'extrémité de la prairie précédente. La teneur en argile est plus faible et aussi plus variable dans le profil : 7,5 p. 100 en surface avec 7,6 p. 100 de matière organique. Le sol est très fin en surface : wca - xxx mais un peu plus grossier dès 70 cm : ria - xxx.

L'altitude semble plus élevée de 20 à 30 cm par rapport au point précédent.

Marbrures dès 60 cm et couche mouillée vers 120 cm.

8 B — Seine à 2 060 m. Prairie dans laquelle se trouve le puits et le petit groupe élévatoire alimentant Saint-Maurice-d'Ételan et les communes voisines.

Il est intéressant de remarquer que ces prélèvements d'eau dans la nappe collatérale à la Seine, par les communes et surtout par les usines de N.-D. de Gravenchon, sont en train de modifier profondément la structure des sols de l'arrière marais (au contact du talus bordant le plateau).

Ils s'assèchent visiblement et les puits peu profonds alimentant les quelques fermes établies en marais, tarissent, ce qui pose de graves problèmes aux exploitants.

Ce profil 8 B est à la fois très fin et plus argileux que les précédents. On trouve 13 à 15 p. 100 d'argile en surface et 8 à 9 p. 100 de matière organique. La couche inférieure, vers 120 cm, est très humide et nettement bleuâtre, indiquant un horizon à gley.

8 C — A 2 280 m de la Seine. C'est le dernier profil sur alluvions modernes de cette première traversée de l'anse de Vieux Port. A l'extrémité de la prairie se trouve le chemin rural montant le long du talus vers les maisons de Saint-Maurice-d'Ételan.

Le sol est à la fois très fin, très argileux 27 à 36 p. 100 jusqu'à 50 cm et très humifère en surface : 12 à 13 p. 100. Au-dessous de 30 cm, le sol est pauvre en matière organique 1 à 2 p. 100 et au-dessous de 80 cm la teneur en argile est faible, moins de 3 p. 100.

Toutefois, au-dessous de 1 m. un horizon à gley, bleuté et humide indique que le sous-sol profond est constamment noyé.

Bien que la teneur en calcaire soit normale, le pH atteint des valeurs élevées. Par contre, le fer libre solubilisé par l'acide citrique à 2 p. 100 disparaît presque complètement vers 1,25 m.

Voici le tableau concernant certains dosages de ce profil :

Couches	8C *a*	*b*	*c*	*d*	*e*	*g*	*i*
Profondeur moyenne (cm)	6,5	20,5	31,5	44,5	57,0	85,0	113,0
Matière organique %	12,5	2,1	1,5	1,1	1,1	1,0	0,9
C/N	9,1	8,8	8,4	10,9	7,0	7,1	9,3
Argile %	27,8	36,1	31,8	27,1	8,0	2,9	1,4
Calcaire total %	15,6	24,7	29,6	32,5	30,7	29,9	29,9
CO_3Ca % des sables fins	17,0	22,8	27,4	31,8	28,9	29,3	28,9
Fer libre %	0,725	0,420	0,427	0,435	0,288	0,127	0,097

La matière organique est relativement peu évoluée en profondeur car le rapport C/N reste voisin de celui trouvé en surface contrairement à la diminution constatée dans les autres profils. Le lessivage du calcaire superficiel paraît accentué car la proportion de calcaire dans les sables fins n'est que de 17 p. 100 en surface contre 29 à 32 en profondeur. Il s'agit en effet des alluvions modernes les plus anciennes de la traversée et nous avons vu dans notre étude du méandre de Duclair (JOUIS, 1959) que les alluvions estimées vieilles de 17 siècles, -p. 688 — ont perdu 40 à 60 p. 100 de leur calcaire sableux fin en surface.

Notons que ces horizons à gley au bas du talus de St Maurice d'Ételan sont les seuls que nous ayons trouvés jusqu'ici aussi développés au cours de tous nos sondages en vallée de Basse-Seine.

8 D — A 2460 m de la Seine, sur la butte (25 m NGF) portant la commune de St Maurice d'Ételan. Cette butte de craie sénonienne est recouverte d'un manteau d'alluvions anciennes sablo-caillouteuses, généralement peu épais.

Pour ce profil, situé à environ 75 m de la déclivité, la terre végétale ne dépasse guère 40 cm. A cette profondeur il y a déjà 50 p. 100 de craie.

Plus loin, la terre exploitable par les racines est plus épaisses et repose, d'après le graphique d'APEL n° 1 sur des sables rouges argileux contenant 10 p. 100 de silex roulés, en général puissant de 1 à 2 m, mais pouvant remplir des poches ou des ravins dans la craie d'où parfois des profondeurs de 10 m et plus.

Au-dessus d'un tel entonnoir large et profond, bien comblé, le sol n'est pas forcément déprimé, cependant il est évident qu'il est encore plus sec si le sable et les cailloux dominent. Il peut au contraire conserver de la fraîcheur aux arbres (petits bosquets) si l'argile est abondante.

Revenant au profil 8 D sur cour de ferme plantée et pâturée, on trouve près de 10 p. 100 d'argile en surface avec 7 p. 100 de matière organique, 1 p. 100 de calcaire en grains séparés, d'où une terre fine un peu acide pH = 6,6. Peu de cailloux.

Dès 20 cm les cailloux sont à 32 p. 100. Le calcaire entre 5 et 6 p. 100 et le pH atteint 7,6. L'argile et l'humus ont peu baissé.

A 30 cm les cailloux sont à 49 p. 100, le calcaire à 14 p. 100 le pH à 8,0 l'humus à 5 p. 100 et l'argile à 7,9 p. 100 de la terre fine, soit environ 4 p. 100 du sol total. Dès 40 cm, on arrive au calcaire.

Le spectre sableux siliceux montre des quantités de sables grossiers de l'ordre de 20 à 30 p. 100 du total des sables, dont 15 à 20 p. 100 dans la classe 0,2 - 0,5 mm.

Les cailloux non calcaires sont des silex roulés ou éclatés et quelques grès roulés. Dans les sables grossiers se trouvent des quartz blonds.

8 E — Situé une centaine de mètres plus loin, ce profil arrêté à 33 cm ne contient plus de craie, ce qui indique la présence de sous-sol profond sablo-caillouteux signalé par APEL. Toutefois, la teneur en cailloux de la surface est nettement plus élevée qu'à 30 cm de profondeur, ce qui peut s'expliquer par un lessivage latéral des particules fines.

Un tel lessivage latéral sur pentes faibles est assez fréquent et rend compte des limons très caillouteux en surface que l'on rencontre dans certains endroits. C'est en plus petit le même phénomène que celui auquel est due l'accumulation des blocs de grès de la Forêt de Fontainebleau.

Les pH soulignent également l'éloignement du socle calcaire. Ils varient de 5,7 à 6,2.

L'argile est faible 4 à 6 p. 100. La matière organique varie de 3,2 en surface à 2,6 vers 30 cm. Les sables sont légèrement plus grossiers qu'en 8 D, par exemple, vers 30 cm : keg - ged contre nff - fdc.

8 F — Encore plus éloigné du talus. Seine à 2 820 m. Ce profil est toujours très caillouteux en surface (19,9 p. 100) et en profondeur (31,4 p. 100 vers 50 cm) avec passage intermédiaire peu caillouteux (2 à 3 p. 100).

Il y a concentration de cailloux par lessivage en surface et richesse intrinsèque du sédiment en profondeur.

Si l'on admet que la quantité de cailloux trouvée à 30 cm (2 à 3 p. 100) dans les deux derniers profils est la quantité moyenne dans le sédiment superficiel d'origine, les cailloux superficiels (20 à 30 p. 100) correspondraient à un enlèvement de 10 fois la couche restante, soit environ 3 mètres sur la parcelle prospectée.

Il est difficile de dire si ce raisonnement est valable. La présence de silex et de grès roulés implique en principe un dépôt de la Seine, confirmé par la faible altitude, mais ce dépôt est sans doute très ancien, au minimum antérieur à la dernière glaciation, c'est-à-dire vieux d'au moins 60 000 ans. Il est vrai que le lessivage n'a pu se produire que là où le sol était plus ou moins dénudé, c'est-à-dire pendant des périodes de quelques milliers d'années au cours de la dernière glaciation.

L'acidité est assez forte, pH entre 5 et 6. Le fait que le pH = 6,1 en surface indique des apports amendants.

L'argile est faible, 5 à 6 p. 100. L'humus est à 3,1 en surface et 1,5 vers 50 cm.

Les index des sables siliceux sont analogues à ceux des deux profils précédents.

Les rapports C/N sont de 10 à 11 en surface contre 8 à 9 en profondeur.

TRAVERSÉE B. (PETIVILLE)

Remarquons d'abord que l'on écrit tantôt Petiville, tantôt Petitville. Cette dernière forme est plus logique, mais la première paraît dominer.

Alors que la traversée de Saint-Maurice-d'Ételan recoupait plusieurs rives anciennes, la traversée B est presque intégralement sur dépôts récents d'alluvions modernes.

Entre les traversées A et B, mais plus près de B et parallèlement à elle, se place la ligne des sondages effectués pour la Société des Chemins de Fer de l'Ouest aux environs de 1900, qui a permis à APEL de faire connaître le sous-sol de la vallée préhistorique (coupe géologique n° 1) en cet endroit.

Voici la liste des profils de la traversée B :

Repères	Nos d'analyses	Distance à la Seine, en m	Coordonnées Lambert		Altitudes en mètres	Observations
9 D	R 1791/98	100	470,700	197,070	± 4	km 330
9 E	R 1799/1803	600	499,820	192,730	± 4	
9 F	R 1804/08	1 200	471,080	197,360	± 4	
10 A	R 2087/95	1 550	471,830	197,910	± 4	
10 B	R 2096/2104	1 750	472,040	198,040	± 4	
10 C	R 2105/12	1 950	472,160	198,140	± 4	
10 D	R 2113/20	2 120	472,300	198,270	± 4	
10 E	R 2121/28	2 320	472,510	198,350	± 4	
10 F	R 2129/33	3 040	473,620	198,030	± 6	
10 G	R 2134/38	3 020	473,610	198,010	± 6	
12 A	R 2494/501	2 990	473,590	198,010	± 8	
12 B	R 2502/08	2 960	473,580	197,980	± 9	
12 C	R 2509/14	2 920	473,560	197,980	± 12	
12 D	R 2515/19	2 840	473,520	197,850	± 15	
12 E	R 2520/22	2 880	473,700	197,670	± 21	

9 D — Seine à 100 m, au km 330. Cette ancienne prairie établie sur les alluvions récentes déposées après 1853 a été convertie en labour environ 15 ans avant les prélèvements. En 1958, la culture était un colza.

Le sol est encore assez foncé, jusqu'à environ 30 cm, ce que reflètent les doses de matière organique de 3,7 en surface et 2 p. 100 à 35 cm.

L'argile est faible : 3 à 5 p. 100.

Il s'agit d'un sable fin 2/3 siliceux et 1/3 calcaire, assez homogène, avec un spectre siliceux qui est mnc-xxx à 45 cm de profondeur, donc bien filtrant et même sec en été non pluvieux.

9 E — Seine à 600 m. Cette partie n'était en culture que depuis 6 ans. En maïs en 1958.

La teneur en argile est nettement supérieure : 15,3 p. 100 en surface et 18,8 vers 40 cm, mais nous retombons à 2 p. 100 vers 70 cm.

En même temps, le spectre siliceux, très fin, en surface ufa/xxx redevient un peu plus grossier en profondeur : mmd/xxx à 70 cm. On a donc une image nette de la texture à cette distance du fleuve, savoir : une alluvion argilo-calcaire assez fine, environ 60 cm reposant sur une alluvion presque dépourvue d'argile et relativement plus grossière en profondeur. Il s'agit toujours d'un sable fin, dont tous les éléments sont inférieurs à 0,2 mm mais quand l'argile fait défaut, il se ressuie très facilement.

La couche superficielle contient 2,4 p. 100 de matière organique.

9 F — Seine à 1 200 m. En culture depuis 6 ans comme E — mais la surface paraît plus sèche.

Cette impression est confirmée par l'analyse, qui montre 6 à 7 p. 100 d'argile jusqu'à 90 cm et un sable un peu moins fin, par exemple kpb/xxx à 37 cm contre vea /xxx en E à la même profondeur. Toutefois, vers 60 cm nous retrouvons un sable assez fin sga/xax et à 95 cm le fond du trou s'emplit d'eau. Des marbrures sont apparues dès 40 cm.

Ceci est un exemple de texture perceptiblement différentes entre deux profils distants de 600 mètres dans un même champ d'aspect général uniforme. Le premier

9 E assez riche en argile en surface et très fin, le second 9 F pas très riche et moins fin, paraissant plus sec, etc.

Ces différences physiques sont généralement visibles dans les cultures, surtout en années extrêmes, sèches ou humides.

10 A — à 1 550 m de la Seine. Il s'agit d'une prairie d'assez bon aspect, à base de dactyle et de trèfle blanc.

Quoique toujours sur alluvion calcaire finement sableuse, on note une tendance au grossissement des sables, avec traces de sables grossiers. Les couches superficielles : ola/aax — nmb/aax à 8 à 10 p. 100 d'argile sont un peu plus fines que les couches profondes (plus d'un mètre) : fsf/axx — fqg/aax avec 4 ou 5 p. 100 d'argile.

La matière organique est de 4 à 5 p. 100 en surface contre 1 p. 100 et moins en profondeur.

Le plan d'eau n'est pas atteint (début mai 1960).

Les teneurs en calcaire total se cantonnent toujours autour de 30 p. 100. Le calcaire p. 100 des sables fins est assez élevé : environ 33 p. 100 depuis la surface jusqu'à plus d'un mètre, appuyant la notion que toutes ces alluvions de la traversée de Petiville sont récentes et n'ont pratiquement pas subi de lessivage en surface.

10 B — Seine à 1 750 m. Prairie pâturée, resemée après retournement datant de plusieurs années.

Profil analogue au précédent, mais un peu plus humide en profondeur.

10 C — Seine à 1 750 m. Cette prairie pâturée est encore à 450 m du talus bordant les alluvions modernes.

Le sol superficiel est très sec et seulement un peu frais vers 30 cm. Tout le bas du profil est ferrugineux, marbré.

La teneur en argile est assez forte dans les premiers 50 cm : 14 à 17 p. 100, avec une matière organique de 9 p. 100 en surface et 4 à 5 p. 100 dans le premier sous-sol.

La teneur en calcaire est de l'ordre de 30 p. 100 dans tout le profil. La proportion de calcaire dans les sables fins montre qu'il n'y a pas de lessivage appréciable depuis l'époque du dépôt. En concordance avec la teneur en argile, le sol superficiel est également très finement sableux sha/aax vers 20 cm. Mais il devient relativement plus grossier en profondeur, par exemple iof/aax vers 90 cm avec 4 p. 100 d'argile et 0,9 p. 100 de matière organique.

10 D — A 2 120 m de la Seine. Cette prairie pâturée est un peu fraîche en sous-sol. Après un mètre, se trouve un passage vaseux, plus foncé et plus humide au-dessous, la sonde s'enfonce rapidement dans un sable un peu mouvant.

L'analyse corrobore ces constatations ; on trouve 13 à 14 p. 100 d'argile en surface jusqu'à environ 20 cm puis la proportion descend à 5 p. 100 pour remonter à 10,5 p. 100 vers 105 cm et retomber à 5 p. 100 à 120 cm.

La matière organique est entre 7 et 8 p. 100 en surface mais 0,7 à 90 cm avec une remontée à 1,8 dans le passage argileux vaseux.

Les sables très fins en surface sga/aaa, grossissent vers 50 cm avec l'index ipe/axx pour s'affiner nettement vers 105 cm olb/axx et redevenir relativement grossiers vers 120 cm : gog/ axx.

On détecte donc franchement dans ce profil un dépôt vaseux entre 1 m et 1,20 m, indice d'une ancienne surface assez brusquement recouverte d'un sable plus grossier, puis finalement d'une nouvelle alluvion fine : la surface actuelle.

10 E — Cette prairie pâturée est la dernière avant un petit ruisseau « Le Théluet »

et un chemin rural montant le long du talus jusqu'au chemin départemental D 81.

La dénivellation du talus est d'environ 10 mètres. Sur la carte au 1/20 000 Pont-Audemer 3-4, cette bande de terre, d'après un relevé sur le terrain de 1952, est marquée comme marécageuse.

Or, depuis 2 ou 3 ans, elle se présente au contraire comme sèche, ainsi qu'on pouvait le constater sur un champ de betteraves voisin.

Les agriculteurs attribuent cette transformation à l'abaissement de la nappe phréatique par les pompages des usines de Notre-Dame de Gravenchon, ainsi que je l'ai signalé plus haut.

En fait, notre sondage jusqu'à 115 cm n'a pas rencontré de couche humide, ce qui prouve que le sous-sol draine parfaitement et que l'état marécageux antérieur était dû à l'accumulation des eaux provenant de la base du talus, insuffisamment drainées par Le Théluet. Du fait des pompages voisins, ces eaux descendent aujourd'hui directement dans le sous-sol profond.

Par ailleurs Le Théluet qui ne déborde plus que très rarement, est devenu une sorte d'égout.

Donc, bien que le sol superficiel soit noir sur 20 cm, il n'est absolument pas tourbeux et le sous-sol est du sable fin calcaire clair.

On trouve 10 à 13 p. 100 d'argile dans les 50 premiers centimètres, mais environ 5 p. 100 vers 1 m.

La matière organique varie de 4 à 5 p. 100 en surface mais n'est plus que de 0,8 p. 100 à 1 m.

Le sable est très fin superficiellement : rha/aaa ; il grossit en profondeur : dsf /axx à 1 m. Le calcaire est relativement uniforme.

Nous sommes loin des profils très argileux des arrières prairies d'Anneville-sur Seine (Jouis et coll., 1959) avec 30 à 40 p. 100 d'argile et des sables très fins d'index wba/axx même en profondeur. Ces prairies, nous l'avons signalé, ne drainent jamais dans le sous-sol et sont entièrement dépendantes des fossés et rigoles pour leur assainissement.

Carrières du talus. — Sur toute la surface des alluvions anciennes s'ouvrent de nombreuses carrières de sables et cailloux utilisés pour la construction et pour le garnissage des chemins.

Toutefois, et surtout aujourd'hui, ces carrières ne sont exploitables que si elles s'enfoncent dans une couche assez épaisse et cela dépend des vallonnements sous-jacents de la craie. Il en résulte que beaucoup de fouilles préliminaires ne sont pas transformées en exploitations de carrières. Il semble qu'actuellement les sites commercialement exploitables sont devenus rares.

10 F — Ce profil est établi un peu à l'est du prolongement de la traversée précédente dans le marais, sur le fond du talweg du petit vallon appelé « La Ravine » après son croisement par la D. 23, au Petit-Ourville.

Distance à la Seine 3 040 m. Altitude 6 m. En cet endroit le talweg est à pente faible, environ 0,5 p. 100. Il est enjambé par un pontet sous la D. 28 dont la chaussée est à 7 m.

Pendant les hivers très pluvieux et éventuellement après une très forte pluie d'orage, ce vallonnet draine les eaux de ses flancs depuis le bord du plateau de limon, plusieurs kilomètres vers l'ouest.

D'après l'exploitant, ce fond est plus argileux et plus frais que les flancs avoisinants.

En réalité, l'analyse montre que la teneur en argile est assez faible 11 à 12 p. 100 en surface, mais elle est encore de 8 p. 100 à 1,12 m. La matière organique est également faible 1,9 p. 100 en surface et 0,8 en profondeur.

Il y a quelques graviers, moins de 1 p. 100.

En résumé la fraîcheur vient uniquement de la position basse de ce point du champ et de la profondeur du sol, par ailleurs pas très grossier : qhc/cca en surface ; rib/aax à 90 cm.

D'après la carte géologique n° 1 d'APEL (1905) l'épaisseur de terre dans le fond de cette ravine creusée dans la craie blanche sénonienne est de l'ordre de 5 m dont 2,50 de sables rouges et silex roulés au fond et 2,50 de limons peu caillouteux provenant des pentes jusqu'à la surface.

10 G — Dans le même champ, à 25 m du précédent profil, au début de la remontée sur le flanc sud du vallonnet.

Ce changement de situation est nettement caractérisé par un accroissement du sable grossier et une légère augmentation des graviers et petits cailloux.

Les sables grossiers atteignent 22 à 26 p. 100 dans le profil, alors qu'ils varient de 2 à 6 p. 100 au centre du thalweg.

De même, les cailloux et graviers passent d'une fraction d'unité à des teneurs de 2 à 3 p. 100.

Il semble y avoir un petit renforcement de la teneur en cailloux vers 70 cm mais il faudrait rassembler les résultats de plusieurs sondages pour conclure. Il est d'ailleurs normal que les facteurs de ruissellement aient pu faire varier les proportions de cailloux dans les différentes couches. Quand il ne s'agit que de variations de quelques pour cent, cela n'entraîne pas de conséquences agronomiques.

Corrélativement, les teneurs en éléments fins et très fins ont baissé. 4 à 5 p. 100 en limon et 2 à 3 p. 100 en argile, sauf toutefois à la plus grande profondeur. La teneur en humus est également un peu plus faible, par exemple 1,60 p. 100 en surface contre 1,90.

12 A — Dans le même champ, 2 mètres plus haut. En Trèfle violet, envahi de spergule, après Avoine. D'après le cultivateur, ce champ un peu caillouteux peut produire jusqu'à 50 quintaux de blé en année humide, mais au plus 35 quintaux en année sèche.

Les cailloux ne dépassent pas 5 p. 100 de la terre brute et disparaissent audessous de 1 mètre.

La quantité de sable grossier est élevée, de l'ordre de 25 à 30 p. 100, mais avec passage de 12 à 18 p. 100 entre 0,70 et 1 m. Le limon et l'argile sont faibles : 5 à 7 p. 100 pour l'argile en surface, s'amplifiant à 18 p. 100 vers 1 m pour redescendre à 13 p. 100 à 1,30 m.

12 *B* — Dans le même champ, un mètre plus haut. Les cailloux sont plus abondants ; environ 5 p. 100 en surface, avec passage de 12 et même 20 p. 100 en profondeur.

Sable grossier de l'ordre de 30 p. 100 en surface mais 22 p. 100 à 1,25 m.

Limon et argile faibles en surface. Environ 5 p. 100 pour l'argile mais forte augmentation à partir de 90 cm pour l'argile qui atteint 17,5 p. 100 et passe à 26 p. 100 à 1,25 m.

Les pH sont entre 5 et 6.

12 C — On approche de la partie haute du flanc du vallon sec. Altitude NGF = 12 mètres, soit 3 m au-dessus du profil 12 B.

Cailloux de l'ordre de 5 p. 100 en surface, passant à 11 p. 100 à 70 cm, puis 2,2 p. 100 à 85 cm et 44 p. 100 à 95 cm.

Ces cailloux sont toujours des silex blancs ou gris, plus ou moins émoussés, accompagnés parfois d'un galet roulé genre galet de Sinceny. On trouve aussi dans les graviers et surtout dans les sables grossiers, des grains de quartz roulés.

Les sables grossiers sont abondants, 30 à 37 p. 100, le limon et l'argile sont faibles. Pour l'argile on a 4 à 5 p. 100 en surface et 10 à 13 p. 100 à 1 m.

La matière organique, comme pour les profils précédents, est assez faible : 1,5 p. 100 en surface, 1 p. 100 vers 50 cm et 0,5 p. 100 vers 1 m.

Les pH sont entre 5 et 6.

12 D — On atteint le haut de la pente du vallon. Cette pente est de l'ordre de 5 p. 100 et l'exposition est nord.

Les cailloux sont encore plus abondants, 6 à 7 p. 100 de la terre brute en surface et jusqu'à 55 p. 100 à 80 cm.

Les sables grossiers varient de 35 à 45 p. 100. L'argile est aussi basse que 3 à 5 p. 100. La matière organique varie de 1,8 p. 100 en surface à 0,5 en profondeur.

Les pH sont inférieurs à 6 en profondeur, mais on trouve 6,2 en surface.

12 E — Ce profil est pris à 40 mètres du haut du vallon, sur un dôme aplati, à 21 m d'altitude. La Seine est à 2 880 mètres.

Nous sommes toujours sur alluvions anciennes et le sol est très caillouteux 14 p. 100 en surface et 63 p. 100 à 45 cm de profondeur.

Les cailloux sont des silex blancs ou gris, émoussés, assez plats. Il y a également quelques fragments de grès, quelques petits galets de silex et de nombreux quartz roulés.

Les sables grossiers sont entre 30 et 33 p. 100 ; le limon entre 8 et 10 p. 100 ; l'argile entre 5 et 6 p. 100. La matière organique atteint 2,7 en surface et 1,7 à 45 cm.

Le pH est entre 5 et 5,5.

D'après la carte géologique n° 1 déjà citéee, ce dôme appelé « mamelon de Plante Capon » est en craie blanche sénonienne revêtue d'environ 1,60 m de sables rouges argileux avec 1/4 de silex roulés, et 0,40 m de terre végétale.

Les galets très aplatis un peu émoussés résultent, semble-t-il, de l'action des phénomènes périglaciaires du Würm, avec reprise ultérieure par l'eau rapide de la Seine de cette époque.

Tous les spectres sableux des profils que nous venons de décrire rapidement sont analogues, par exemple : ihg/idc pour le sol du 12 E marquent bien l'état grossier de la terre fine.

Ceci, joint à la faible quantité d'argile et à la grande quantité de cailloux, montre qu'il s'agit de terres très pauvres, très filtrantes, acides...

Un enrichissement en matière organique par des cultures fourragères fréquentes est sans doute ce qui convient le mieux à ce genre de sol, qui heureusement est assez bien arrosé sous le climat normand.

TRAVERSÉE C. (ST JEAN DE FOLLEVILLE)

Cette traversée débute perpendiculairement au sommet nord de la courbe du fleuve qui suit la fin de l'estuaire de Tancarville, un peu avant le kilomètre 335 rive droite.

Rappelons que la descente de la Seine de Paris à la mer est jalonnée de bornes kilométriques sur lesquelles il est facile de se repérer pour déterminer l'emplacement exact d'un terrain limitrophe.

En cet endroit, la digue bétonnée date de 1852-1856, son sommet est à + 4 m NGF et les alluvions modernes près de la digue sont montées à cette même cote, peu après sa construction..

Il est difficile de dire dans quelle proportion le remblayage définitif a été naturel. Il est probable que les sols les plus proches de la digue ont reçu une certaine quantité de sables de dragage.

Voici la liste des profils de la traversée C :

Profils	Nos analyses	Distances à la Seine	Coordonnées Lambert	
9 A	R 1172/79	105 m	467,250/200,380 ± 4 m	1855 et après
9 B	R 1780/82	150 m	467,100/200,460 ± 4 m	—
9 C	R 1783/90	350 m	467,160/200,580 ± 4 m	—
13 A	R 2544/47	1 120 m	467,300/201,400 ± 4 m	—
13 B	R 2549/54	1 320 m	467,300/201,600 ± 4 m	—
13 C	R 2555/60	1 550 m	467,340/201,830 ± 4 m	avant 1834
13 D	R 2561/67	1 700 m	467,610/201,930 ± 5 m	—
13 E	R 2568/74	2 100 m	467,970/202,270 ± 5 m	—

9 A — Ce premier profil est à 105 mètres de la berge, au milieu d'une prairie permanente.

Tout le profil est dépourvu de sables grossiers. Les sables fins sont répartis entre les classes 20-50 μ et 50-100 μ donc moins ténus que dans le limon éolien de Haute-Normandie.

Le sous-sol comporte 31 à 33 p. 100 de calcaire mais le calcaire s'abaisse à 20 p. 100 en surface.

Le CO^3Ca p. 100 des sables fins montre un abaissement du même ordre, ce qui peut faire penser à un lessivage sur alluvions déjà âgées, mais sans doute déplacées.

La surface est relativement riche en argile : 13,3 p. 100 et naturellement riche en matière organique 9,5 p. 100.

Au-dessous de 20 cm l'argile tombe à environ 3 p. 100 et la matière organique oscille entre 1 et 2 p. 100.

Les pH varient de 7,7 en surface à plus de 8 en profondeur.

9 B — Environ 150 m de la berge, dans une partie de la même prairie labourée depuis 1958.

Le profil est analogue.

9 C — Environ 350 m de la berge, à l'extrémité de la même prairie. Mêmes caractéristiques générales.

13 C — La partie centrale de la traversée étant inondée au moment des profilages, ceux-ci ont repris à 1 120 m de la Seine, toujours dans les alluvions relativement récentes, quoique sans doute un peu plus vieilles, tout au moins en profondeur, qu'aux abords immédiats du fleuve.

La prairie examinée est assez basse. Au milieu de février 1961, l'eau stagnait entre les billons et dans les marques de pieds d'animaux. Cependant cette prairie naturelle avait assez bon aspect et commençait à pousser (bien verte). Le trèfle blanc était en proportion convenable et il y avait peu d'adventices (quelques renoncules et quelques paquerettes.)

Le sol est fin : sga/xxx mais il devient un peu plus grossier au-dessous de 40 cm : lao/xxx et encore plus en profondeur : kpa/axa à 125 cm.

La surface est humifère : 12 p. 100 de matière organique, mais dès 25 cm la matière organique est faible : 1,5 p. 100 pour devenir presque nulle en profondeur.

L'argile est entre 22 et 25 p. 100 en surface puis à 15 p. 100 à 50 cm et entre 7 et 10 p. 100 en profondeur.

13 *B* — Dans une prairie resemée en 1958 et qui néanmoins paraît plus dégradée, plus ouverte que la précédente.

Le profil est établi à 200 m du précédent en s'éloignant du fleuve. La texture est déjà relativement grossière en surface : pka/aaa contre sga/xxx pour 13 A et encore plus en profondeur avec ira/xxx à 120 cm.

La surface est nettement moins humifère : 6,1 p. 100 en surface et moins argileuse : 19 à 20 p. 100.

En profondeur, matière organique et argile sont comme pour 13 A.

13 C — Il s'agit d'une prairie très humide bordée au N. par la rivière de Radicatel. Il y avait 10 cm d'eau entre les billons au moment du profilage. Le sol était couvert de mousse et d'adventices, notamment des renoncules.

Cependant, la texture n'est pas très fine : mma/xxx en surface et jqa/xxx en profondeur. La surface du sol est très noire, avec 10 à 11 p. 100 de matière organique, tombant à 1,8 p. 100 à 25 cm et 0,6 vers 1 m.

L'argile est à 10 p. 100 en surface mais atteint 20 p. 100 vers 70 cm pour redescendre à 7 p. 100 à 120 cm. Elle est alors bleutée (gley).

D'après la carte des Ponts et Chaussées déjà mentionnée, ce terrain se trouverait dans et à la limite des alluvions en place en 1834.

13 D — Prairie au nord et à l'est de la précédente à 1 700 m de la Seine (profil à environ 150 m au nord du précédent). Dans les alluvions existant en 1834. Non mouillée car à + 5 mètres.

Texture relativement grossière, avec jpa/aax en surface ; un passage plus fin : rha/aax à 85 cm et un retour à qja/xxx en profondeur.

La terre est noire en surface, avec 12 à 13 p. 100 de matière organique, mais 2 p. 100 dès 25 cm et 0,7 à 1 p. 100 en profondeur.

L'argile est assez faible en surface de 9 à 11 p. 100 mais 27 p. 100 vers 70 cm et au-dessous.

Dans tous les profils précédents 13 A à 13 D le calcaire total est de l'ordre de 19 à 20 p. 100 en surface, 25 p. 100 vers 25 cm et 30 à 33 p. 100 en profondeur.

Par ailleurs, la proportion de calcaire dans les sables fins augmente généralement depuis la surface. Dans notre étude sur les sols du méandre de Duclair, nous

avons interprété ce fait en admettant que les alluvions modernes les plus anciennement déposées avaient subi un lessivage important.

Dans la série des profils de la traversée C, le profil 13 A sur alluvions récentes apparaît comme peu évolué avec 30,4 p. 100 de calcaire dans les sables fins de surface alors que le profil 13 D (sur alluvions plus vieilles) avec 21,8 p. 100 apparaît comme lessivé.

Toutefois les profils des bords de la Seine 9 A à 9 C qui sont en principe sur remblayage récent présentent également un pourcentage de 19 à 24 en sables calcaires fins de surface. Sans doute faut-il voir là le résultat de déplacement naturel ou par dragage d'alluvions déjà évoluées en vue de combler le hiatus existant entre les digues nouvellement construites et l'arrière banc plus ou moins stabilisé.

13 E — Ce terrain, cultivé depuis une dizaine d'années, est en bordure de la route nationale 182 allant au Havre.

Le profilage a montré qu'il avait été assez remanié en surface.

Bien qu'éloigné de 400 mètres du profil précédent par rapport à la Seine, et de même niveau, soit environ + 5 m NGF, il est nettement plus humide, par suite de la proximité de la nappe d'eau dans le sous-sol. Le pied des falaises de Radicatel, très sourceuses, se trouve à environ 120 m au nord du profil. Dès la fin du forage, l'eau est rapidement montée à 20 cm de la surface du terrain.

Le sol est très noir, avec 6 à 7 p. 100 de matière organique. La matière organique baisse, en oscillant, jusqu'à 3,2 p. 100 à 90 cm, puis à 1,1 p. 100 à 1,20 m. Le sol devient gris clair à partir de 90 cm.

La teneur en argile reste forte dans tout le profil, entre 19 et 25 p. 100.

La texture sableuse est fine, par exemple tfb/baa en surface et ufa/aaa à 60 cm. La teneur en calcaire est faible en surface 4 à 5 p. 100, puis variable de 9 à 12 p. 100 jusqu'à 1 m ou elle passe assez brusquement à 25-26 p. 100.

Il semble que l'on retrouve le sol ancien à partir de la zone 90/100 cm. Ceci est confirmé par le pourcentage de calcaire des sables fins qui est de l'ordre de 10 p. 100 en surface, puis 16 à 20 p. 100 jusqu'à 90 cm et 35 p. 100 après 90 cm, c'est-à-dire analogue au pourcentage dans les sables fins profonds des autres profils.

LES ÉLÉMENTS NUTRITIFS DANS LES MARAIS

Le fait dominant est la grande richesse en calcaire, de l'ordre de 20 p. 100 dans le sol et 30 p. 100 dans le sous-sol. En dehors des débris de coquillages, il y a suffisamment de calcaire tendre pour que le pH soit nettement au-dessus de 7 en surface et aux environs de 8 à faible profondeur.

Un second fait est que presque toutes les terres cultivées étaient récemment en prairies naturelles. Par conséquent, le sol superficiel est plus ou moins riche en humus. Ce facteur favorable compense, au moins provisoirement, les inconvénients d'un excès de calcaire.

Nous avons déterminé l'azote total par la méthode Kjeldahl pour tous le sols et premiers sous-sols, ainsi que pour un grand nombre d'horizons profonds.

Pour plusieurs profils, nous avons également déterminé le carbone méthode ANNE.

En ce qui concerne l'acide phosphorique, la potasse et la magnésie, nous avons analysé systématiquement le sol et le premier sous-sol de tous les profils par extraction rapide au réactif Morgan (acétate de soude/acide acétique tamponné à pH = 4,8) en exprimant les résultats en p.p.m. pour faciliter les comparaisons.

Enfin, nous avons eu l'occasion de faire quelques déterminations de soufre. dont nous rendrons compte dans un autre travail. Disons seulement que les sols de cette région paraissent riches en soufre.

Azote total.

Entre 0 et 25 cm pour les labours dont beaucoup étaient en prairies il y a peu d'années et entre 0 et 12 cm pour les vieilles prairies, l'azote varie de 1,31 à 7,12 p. 1000 pour les 3 traversées réunies (Marais).

Pour les premiers sous-sols, c'est-à-dire 25 à 40 cm, pour les labours et 12 à 25 cm pour les prairies, le plus bas est à 0,23 et le plus haut à 2,59 p. 1000.

La répartition est la suivante :

Limites N ‰	0		1		2		3		4		8
% des dosages : sol		0		32		23		31		14	
1er sous-sol..................		37		45		18		0		0	

On remarque que 18 p. 100 des sous-sols contiennent encore 2 à 3 p. 1000 d'azote total.

Rapport : matière organique/azote.

Si l'on porte la matière organique en ordonnées et l'azote en abcisse, on voit sur un graphique que les points se répartissent de part et d'autre d'une droite $y = 21\ x$ passant sensiblement par le point *o*. Mais les points sont un peu plus groupés à sa gauche. En conséquence la totalité des points, sauf *i* est comprise entre $u = 21\ x + 15$ et $v = 21\ x - 20$.

Rapport : carbone/azote

Nous avons examiné spécialement ce rapport dans la première traversée de Saint-Maurice-d'Ételan. Il nous a paru à peu près normal. On a :

Limites des rapports	7	—	8	—	9	—	10	—	11	—	12
Nombre d'échantillons											
(Sols		1		1		5		3		1	
(Sous-sols		3		4		2		2			

Fer libre :

Pour cette même traversée, nous avons voulu savoir comment se répartissait le fer libre en profondeur. Le dosage a été effectué comme pour l'étude du Pays d'Ouche (JOUIS et LECACHEUX, 1956) c'est-à-dire neutralisation du calcaire par de l'acide oxalique puis adjonction d'un excès donnant une solution à 2 p. 100, attaque 1 minute à l'ébullition et dosage par l'orthophénantroline.

Dans le premier profil, près de la Seine, la teneur variait peu, de 0,31 à 0,44 p. 100 avec la majeure partie des horizons à 0,39.

Dans le second, éloigné de 270 m, la variation est encore peu importante, de 0,24 à 0,52 p. 100 avec la majeure partie à 0,37, mais tendance à la plus grande richesse vers le haut du profil.

Dans le troisième profil, à 370 m, la même tendance se manifeste avec des teneurs, plus élevées, 0,21 à 0,74 p. 100 et une médiane de 0,27.

Dans une autre partie du même champ, la variation est de 0,23 à 0, 63 avec une médiane de 0,55.

En résumé, dans les champs labourés jusqu'à quelques centaines de mètres de la Seine, le fer entre 0 et 130 cm tend à se concentrer en surface, mais reste assez constant dans la plus grande partie du profil. Il y a une certaine concordance entre la quantité d'argile et le fer libre. Pour les 4 profils cités le fer passe de 0,20 à 0,60 p. 100 quand l'argile varie de traces à 15 p. 100.

Il en est différemment dans le dernier profil de marais = 8 C de cette traversée A, laquelle présente un horizon de gley en profondeur.

Depuis la couche *j* à 120/130 cm jusqu'à la surface, on a, en cotes entières :

j	i	h	g	f	e	d	c	b	a
97	*x*	*x*	127	*x*	288	437	427	420	725

La concentration en surface est concomitante d'un net déficit en profondeur, moins de 0,1 p. 100. Cet horizon séché à l'air est resté gris et poudreux (couleur Atlas Munsell = 10 YR 6/1).

La concordance, un peu lâche, constatée entre l'argile et le fer dans les horizons normaux n'existe plus. On trouve par exemple 0,42 à 0,44 p. 100 de fer pour 27 à 36 p. 100 d'argile alors que les autres profils donnaient la même quantité pour 8 à 9 p. 100 d'argile.

L'argile du profil pour cette méthode de dosage est donc déferrisée d'une quantité importante quoique irrégulière.

Acide phosphorique.

Dans les sols très calcaires, l'acide phosphorique est, a priori, largement bloqué sous forme peu soluble. Toutefois, la présence fréquente d'une assez forte quantité de matière organique permet d'envisager une certaine mobilité.

Les engrais phosphatés de même que les engrais potassiques sont, bien entendu, plus ou moins largement utilisés par les agriculteurs modernes, ce qui rend une recherche de la richesse naturelle assez illusoire. En réalité, toute analyse chimique P. K. n'a qu'une valeur locale, très importante pour l'agriculteur mais généralement sans portée générale, tout au moins sur les substrats géologiques en cause ici.

C'est pourquoi nous nous sommes contentés d'appliquer une méthode rapide de discrimination comparative des niveaux de labilité de l'ion orthophosphorique dans la solution Morgan, laquelle même en sol calcaire est suffisamment tamponnée pour assurer une extraction peu au-dessus de pH = 5.

L'expérience prouve que les sols fumés régulièrement sont reconnus par cette méthode et, a priori, les sols les plus riches sont les mieux pourvus.

Si nous préférons exprimer les résultats en p. p. m., c'est uniquement pour faciliter la mémorisation car, d'une façon générale, toutes les méthodes que l'on peut utiliser dans la pratique courante sont arbitraires.

Nous avons constaté, comme prévu, que P_2O_5 extractible était variable suivant les parcelles, entre 8 et 30 p. p. m. plus deux chiffres élevés de 50 à 60 p. p. m. - 50 p. p. m. correspond au sol d'une prairie largement fumée et 60 au sol très fumé et très humifère du profil 13 E.

Il n'y a pas de corrélation nette avec la teneur en matière organique, si ce n'est que dans chaque profil les sous-sols sont à la fois moins riches en P_2O_5 et plus pauvres en humus, ce qui tient surtout, bien sûr, à ce que l'engrais n'influence que le sol.

Potasse.

Les valeurs trouvées dans le même liquide d'extraction varient de 25 à 125 p. p.m. avec quelques valeurs plus élevées atteignant 200 p. p. m. pour la prairie fumée ci-dessus mentionnée.

Sur un graphique N/K_2O on remarque une légère corrélation positive. La surface est toujours plus riche que le premier sous-sol, avec une différence d'autant plus grande que l'engrais est plus copieux et plus récent.

Appréciation de la richesse P et K.

D'après ce que nous avons pu voir de l'aspect des cultures, il semble que le taux de P_2O_5 soit souvent un peu faible jusqu'à 15 p. p. m. mais certainement bon à partir de 30 p. p. m.

Quant à la potasse, elle doit dépasser 100 p. p. m. pour être suffisante.

Magnésie

La richesse en magnésie est une richesse naturelle car dans ces sols très alcalins, on n'a jamais amendé.

Les valeurs trouvées sont fortes, entre 200 et 400 p. p. m. et il semble qu'elles soient suffisantes malgré l'abondance du CO_3Ca.

LES ÉLÉMENTS NUTRITIFS DANS LES ALLUVIONS ANCIENNES

Contrairement aux fines alluvions calcaires humifères et souvent argileuses du Marais, les alluvions anciennes sont sablo-caillouteuses, légèrement ou fortement acides, pH = 5,2 à 6,6, faibles ou très faibles en argile et en humus.

Azote total.

S'il s'agit d'une vieille prairie de cour de ferme l'azote total peut dépasser 3 p. 1000 mais en plein champ, la prairie permanente fournit un chiffre moyen de 1,5 à 1,6 p. 1000 entre 0 et 12/15 cm.

Toutefois, par suite du caractère filtrant du terrain, on trouve encore facilement 1 p. 1000 à 20-25 cm de profondeur.

Quant aux labours, ils n'ont que 0,7 à 1 p. 100 d'azote en surface et 0,4 à 0,7 en premier sous-sol, ce qui est nettement insuffisant. Il faut si possible utiliser largement le fumier et les engrais verts.

C/N.

Ce rapport n'a été calculé que pour les alluvions de la traversée A (Saint-Maurice d'Ételan). Il se maintient entre 9 et 11 suivant les profils, sans grande différence entre le sol et le sous-sol correspondant.

Acide phosphorique.

Dosé sur extrait au réactif Morgan, les chiffres varient avec la fumure. Dans la cour de ferme : 8 Da, on atteint 30 p. p. m. ce qui est élevé pour un sol léger.

Les prairies bien fumées ainsi que les labours sont à 20 p. p. m. en surface et 8 à 10 p. p. m. en premier sous-sol.

Quelques champs sont assez faibles à 8 ou 10 p. p. m. en surface.

Potasse.

Sauf une exception les chiffres sont faibles 25 à 75 p. p. m. Une seule prairie est à 133 p. p. m. Il semble que la fumure potassique soit insuffisante.

Magnésie.

Beaucoup de terres ne contiennent que 30 à 70 p. p. m. ce qui est très faible ou faible. Quelques champs voisins de 200 p.p. m. peuvent avoir reçu un peu de chaux magnésienne.

Le dosage de routine de la magnésie est effectué régulièrement depuis quelques années par la Station agronomique de Rouen. Il a permis de redresser de nombreuses situations de carence.

Nous préconisons toujours la dolomie finement broyée. C'est l'amendement le moins coûteux qui a l'avantage de se dissoudre lentement, donc de durer très longtemps.

Comme les plantes ne consomment pas beaucoup de magnésium un apport de 2000 kg/ha de dolomie est généralement très suffisant pour une vingtaine d'années.

ÉVOLUTION AGRONOMIQUE DES ALLUVIONS MODERNES

Nous avons recherché dans les comptes rendus des séances de la Société Centrale d'Agriculture de la Seine-Inférieure, depuis 1820 et dans les archives de diverses communes, avec le concours de M. VILLALA, Conseiller technique de la Chambre d'Agriculture de la Seine-Maritime, quelles avaient été les transformations des « Marais » de la région de Lillebonne.

Il semble que l'état de ces marais a vivement préoccupé les dirigeants agricoles dans la première moitié du XIX^e^ siècle. Dès la reprise des travaux de la Société Centrale d'Agriculture de la Seine-Inférieure, après la chute du 1^er^ Empire, de nombreux rapports et mémoires traitent du « dessèchement » des terrains marécageux. Par exemple en 1820, un rapport GOUBÉ sur le dessèchement des marais à opérer en S. I. — En 1821 un mémoire de M. DE LA VACQUERIE sur une réalisation originale, à Harfleur — En 1825 un nouveau rapport GOUBÉ, etc. jusqu'en 1849.

Après la construction des digues (1851-1855) les rapports disparaissent des comptes rendus, mais on trouve en 1866 des questions et réponses sur l'étendue des dessèchements des 30 années précédentes. Ensuite, pratiquement plus rien n'apparaît sur la vallée de Seine dans les travaux de cette assemblée.

Dans les archives communales, on ne trouve pas de débats agronomiques, mais surtout des statistiques sur la répartition des territoires communaux et des indications sur l'utilisation des prairies communales du Marais.

Enfin, pour les transformations récentes depuis la fin de la première guerre mondiale, nous avons pu consulter quelques vieux agriculteurs.

Nous avons déjà examiné dans notre premier mémoire sur la vallée de Basse-Seine (Jouis, 1959) quels étaient les largeurs des dépôts des marais à différentes époques, d'après les cartes les plus anciennes existantes.

En ce qui concerne la région de Lillebonne, précisons que le vieux Marais, protégé par une digue de terre depuis longtemps, et pour lequel en tous cas on possède une délimitation de 1710, était déjà fortement cultivé en 1900, tout au moins dans la région de Petiville ainsi que le signale Apel.

En 1900 les nouveaux marais comprenaient quelques bandes de 300 à 500 mètres attestées en 1834 et surtout les prairies qui se sont créées rapidement à l'abri des digues, au début submersibles, érigées à partir de 1851.

En 1883 l'ingénieur Belleville estimait que pour une marée entière, il passait dans l'estuaire, à la hauteur de Rogerville 200 à 300 mètres cubes de matières solides par mètres carré de section. Ces sables et cette vase refluent normalement à la marée descendante, mais après l'établissement des digues, une partie s'est retrouvée prisonnière après chaque débordement.

C'est ainsi que Darcel (1857) calculait qu'en 10 ans, 40 millions de mètres cubes d'alluvions s'étaient déposés derrière les digues construites avant 1857.

En 1960, la différence entre les trois marais tend à s'estomper et la culture arrive au bord de la Seine en plusieurs endroits comme nous le montrerons un peu plus loin.

Donnons rapidement quelques indications sur les premières périodes d'utilisation des marais avant l'installation des digues de 1851-1853.

Les parties protégées de longue date, avant 1710, comportaient de belles prairies et sans doute quelques cultures.

Cependant ce vieux marais n'était pas à l'abri des inondations et aussi des coups de mer.

En effet, avant l'endiguement, l'estuaire se prolongeait jusqu'à Vieux Port, soit environ 13 km après l'extrémité actuelle au Pont de Tancarville.

D'autre part, sa largeur était à la fois très grande et très irrégulière. Entre la pointe de Tancarville et de la digue des Hollandais qui, sur la rive gauche, isolait le marais Vernier, on mesurait environ 5 km alors qu'aujourd'hui la Seine a environ 600 m à cet endroit.

Entre la pointe de Quillebœuf, à l'extrémité amont du marais Vernier et le vieux marais de Lillebonne, il y avait au minimum 2 km.

Par ailleurs les chenaux n'étaient, bien entendu, pas dragués et restaient peu profonds. Il en résultait que les fortes marées et les fortes inondations s'étendaient largement.

La chronique a noté principalement le raz de marée et la crue de 1658, où la hauteur de l'eau atteignit + 7,27 NGF, soit 3,28 m au-dessus des prairies existantes.

En 1810 un autre coup de mer submerge le terrain de 2,32 m causant à nouveau de graves dégâts.

Malgré ces crues et ces ravages de la mer, quelques atterrissements se réalisaient cependant à l'extérieur de la levée de terre protégeant le vieux marais.

Nous n'avons pas relevé de description sur l'établissement de ces bancs herbeux, mais on peut penser qu'ils suivirent, *mutatis mutandis*, les mêmes processus que ceux observés plus récemment entre la pointe de Tancarville et le Havre. On trouvera

dans l'étude publiée en 1942 par Brioux et Jouis sur les alluvions de la vallée de Seine (1942) ainsi que dans l'étude de Hédin sur la végétation des alluvions (1942) une description de ces processus et des plantes colonisatrices.

Quoi qu'il en soit, nous avons déjà dit que des bandes consolidées et utilisées mais relativement étroites étaient cartographiées en 1834 en dehors de la digue du vieux Marais.

C'est justement, d'une part, pour stabiliser et étendre ces bancs susceptibles de porter de riches pâturages et, d'autre part pour canaliser et approfondir la Seine en vue du trafic du port de Rouen, que de nombreux rapports, mémoires et vœux furent rédigés surtout depuis 1820 jusqu'à l'établissement des digues de 1851.

En 1821, M. de la Vacquerie exposait à la Société centrale d'Agriculture de la Seine-Inférieure, comment il avait desséché et converti en culture une partie de marais de 15 ha 60 situé près d'Harfleur.

Le sous-sol riche en argile était absolument imperméable, d'où inondations annuelles par l'eau des pluies et celle provenant des grandes marées.

Les dernières traces d'eau ne s'évaporaient que sous le soleil d'été, comme actuellement dans certains herbages du méandre de Duclair (Jouis, 1959).

En conséquence, on ne récoltait qu'un mauvais foin au milieu de joncs et de carex. En 1810, l'auteur a mis à exécution le projet suivant :

Le terrain est divisé en 14 parties d'environ 1 ha au moyen de rigoles de 1 m de profondeur, larges de 1 m au fond et 2 m à la surface.

Aux extrémités, il a placé des pompes provenant de navires désaffectés et vidé les rigoles deux fois par semaine dans la rivière de Montivilliers se jetant en Seine. Cette rivière était munie d'une vanne empêchant le retour de la marée.

Le système a parfaitement réussi. Chaque parcelle était louée 2.600 francs en 1813. Aujourd'hui cette région a disparu sous l'empiètement urbain.

En 1825 Goubé, Secrétaire perpétuel de la Société Centrale d'Agriculture, fait un rapport sur l'assainissement des Marais. Comme de nos jours il s'agissait de creuser ou d'entretenir des fossés et de les protéger de l'envahissement des marées par des vannes appropriées.

Des collectivités comme les moines de l'abbaye de Jumièges, plus en amont, s'y sont efforcées dès le Moyen Age. Ils avaient réussi à lutter contre les invasions brutales par l'établissement de digues (dès le VII^e^ siècle sous Dagobert I^er^) mais le marais qui se colmatait à l'arrière demeurait fangeux, d'où notamment une épidémie mortelle en 1775-76.

Lepecq de la Cloture, chargé par le Gouvernement de déterminer les causes de cette épidémie, préconise l'assainissement par un système de fossés débouchant en Seine et fermés par des vannes antimarines.

Nous nous en tiendrons à cet aperçu des nombreux rapports et mémoires qui concluent tous à la nécessité de digues et à la création de fossés protégés de la mer.

Situation des marais après l'endiguement

Nous n'avons pas trouvé de document d'ensemble permettant de suivre le colmatage à l'arrière des digues, au début submersibles, mais tout fait penser qu'il fut rapide, au plus quelques décades.

Par exemple, en 1855, on trouve dans les archives de la Mairie de Lillebonne,

des Procès-Vervaux d'expertises établissant la plus value des sols des propriétés riveraines, à la suite des travaux d'endiguement.

En 1866, une séance de la Société centrale d'Agriculture apprend qu'en 30 ans environ 5 000 ha ont été desséchés et des buses posées aux embouchures des petites rivières.

Aux 62 193 ha de prairies naturelles du département, dont 23 200 fauchables et 38 993 pâturées, les endiguements de Basse-Seine ont ajouté 2 515 ha, en grande partie dans la région de Lillebonne.

Sur les prairies des rives de la Seine, on estimait la récolte de 30 à 35 q/ha de foin de bonne qualité, vendu 10 francs le quintal. Les prairies remontant le long des rivières fournissaient un foin « mou » de qualité secondaire, estimé de 60 à 70 q/ha, vendu 7,50 francs le quintal.

Pour 1900, nous trouvons quelques statistiques concernant l'état agricole de toutes les communes bordant la rive droite de la Seine, de Saint-Jean-de-Folleville à Norville. En voici un résumé :

Statistiques 1900. Superficies en hectares.

	St-Jean-de-Folleville	Lillebonne	N.-D. de-Gravenchon	Petiville	St-Maurice-d'Ételan	Norville
Superficie totale	1 317	1 299	1 775	1 486	1 300	1123
Territoire non agricole	– 11	– 344	– 317	– 290	– 4	– 113
	1306	955	1 458	1 196	1 296	1 010
Landes et friches	2	47	2	6	4	2
Vergers	49	47	41	52	35	72
	51	94	43	58	39	74
Pacages (± sur pentes alluvions anciennes)	121	25	470	71	217	37
Herbages (± sur alluvions modernes)	433	500	225	400	555	367
	554	525	695	471	772	404
Cultures et bois	701	336	720	667	485	532
Blé	100	25	225	200	180	178
Seigle	8	5	25	40	30	7
Orge	5	5	10	80	60	12
Avoine	80	15	200	80	80	87
	193	50	460	400	350	284
Betteraves sucrières	14	»	»	»	»	»
Betteraves fourragères	12	5	20	36	4	6
Pommes de terre	1	3	5	30	10	5
Colza	2	8	»	»	»	7
Lin	1,4	»	»	9	2,3	»
Trèfle violet	55	15	100	66	80	30
Luzerne	»	»	10	5	8	5
Trèfle incarnat, Vesces, Pois	»	»	70	80	40	15
	85,4	31	205	226	144,3	68
Nombre de pommiers à cidre	750	2 000	975	750	575	350

Ces six communes bordant la Seine sur 21 km avaient donc en 1900 un total de 2 480 ha de prairies sur alluvions modernes (vieux et nouveaux marais) et environ 941 ha sur sols sablo-caillouteux d'alluvions anciennes.

Les proportions entre ces deux sortes de prairies sont assez variables d'une commune à l'autre car les ouvertures relatives sur la Seine sont différentes. Par exemple Notre-Dame-de-Gravenchon comporte environ 0,8 km de berge contre 6,4 km pour Petiville, sa voisine.

Par ailleurs, Saint-Jean-de-Folleville compte beaucoup de bois, Lillebonne est en partie bâtie, etc.

Les cultures sarclées sont peu étendues et surtout dans les communes comportant un peu de limon des plateaux comme Saint-Jean-de-Folleville, seule à faire de la betterave sucrière et Notre-Dame-de-Gravenchon. Petiville ne possède pas de vrai limon mais cultivait dans le vieux Marais et sur les alluvions anciennes en replat à 25 m d'altitude.

En particulier, la Pomme de terre était relativement développée pour la région.

Toutes les communes font beaucoup de fourrages annuels et en particulier du Trèfle violet à l'instar du Pays de Caux voisin.

Parmi les céréales, le Blé représente environ 50 p. 100 et même un peu plus pour Norville. L'Avoine est la principale céréale secondaire. Le Seigle se situe souvent entre 5 et 10 p. 100.

L'Orge est bien vue à Petiville et Saint-Maurice-d'Ételan. Il faut voir là des actions particulières de cultivateurs avancés.

Notons enfin que le nombre de pommiers à cidre révèle que Lillebonne était particulièrement bien pourvue en herbages plantés.

Il est intéressant de savoir ce que pouvait nourrir prairies et céréales secondaires dans ces 6 communes. On comptait en 1900 :

Animaux	St-Jean-de-Folleville	Lillebonne	N.-D. de Gravenchon	Petiville	St-Maurice-d'Ételan	Norville
Chevaux	90	239	150	112	85	115
Taureaux	6	5	6	4	4	8
Bœufs à l'engrais	18	440	80	30	350	30
Vaches laitières	70	50	46	40	50	50
Vaches à l'engrais	12	400	40	60	400	70
Vaches amouillantes	75	0	126	110	100	200
Génisses	60	40	105	80	60	60
Élèves de plus de 1 an	60	0	65	115	40	30
Élèves de moins de 1 an	60	10	89	90	100	70
Truies	14	4	11	30	4	50
Jeunes truies	6	25	1	35	12	15

Outre les possibilités nutritives de chaque commune, le tableau montre que le catégories d'animaux dépendent aussi des possibilités économiques locales. Par exemple, Lillebonne a un fort contingent de chevaux, et beaucoup d'animaux à l'engrais. Comme il n'y a presque pas d'avoine sur la commune il est clair que les écuries doivent acheter à Notre-Dame-de-Gravenchon et sur le plateau de Caux.

De même, les animaux à l'engrais doivent dépendre en partie de communes voisines.

Globalement, on remarquera le total des 791 chevaux alors que leur nombre est aujourd'hui de quelques dizaines.

Entre 1900 et 1920, il semble que la situation ait peu évolué dans la région de Lillebonne.

Une statistique donne la répartition des terrains pour cette commune en 1925. Malheureusement les catégories ne concordent pas très bien avec celles de 1900. Les herbages non plantés ont portés pour 550 ha ce qui correspond au Marais. Les céréales forment un total de 71 ha contre 50 avec 38 ha de blé contre 25 en 1900, soit toujours la moitié. Le Seigle et l'Orge ne font que 3 ha mais il y a 30 ha d'Avoine contre 15 en 1900.

Les fourrages annuels sont cultivés sur 35 ha contre 15 ha en 1900.

Les rendements officiels sont : blé : 20 q ; seigle : 16 q ; orge : 10 q ; avoine : 24 q ; pommes de terre : 16 t ; betteraves : à sucre 18 t ; betteraves fourragères : 40 t.

Il y a encore 214 chevaux, soit à peu près comme 25 ans auparavant ; 10 taureaux ; 320 bœuf à l'engrais ; 90 vaches ; 50 génisses ; 36 élèves de moins d'un an ; 110 truies, 60 jeunes porcs ; 20 chèvres.

Les animaux à l'engrais sont nettement moins nombreux. Il est vrai que la première guerre mondiale n'est pas loin.

Situation agricole pendant et après la deuxième guerre mondiale

Un fait important s'est produit pendant la deuxième guerre mondiale.

Alors que la culture dans le marais était autrefois localisée dans de petites surfaces du vieux marais, ou était le fait d'agriculteurs d'avant garde, comme M. Berge à Saint-Maurice-d'Ételan, les besoins alimentaires ont fait surgir des cultures vivrières ; notamment pommes de terre, pois, haricots... qui ont fait comprendre aux cultivateurs que le marais était cultivable et que les cultures pouvaient être rémunératrices.

A Norville, une expérience particulière fut tentée dès 1937. Pour améliorer la prairie communale, la municipalité loua des parties successives du Marais à un agriculteur belge qui y cultiva du lin jusqu'en 1943. Environ 2/3 de la prairie fut retournée et améliorée par les travaux et les engrais. La reconstitution ultérieure de la prairie donna satisfaction.

Nous n'étudierons ici que la culture dans les alluvions anciennes et modernes de la région de Lillebonne. Nous réserverons la question de l'exploitation des herbages au troisième et dernier mémoire qui comprendra une dernière catégorie de sols des terroirs de la vallée de Basse-Seine : les sols tourbeux et les sols humifères.

Les cultures en 1960

Ainsi que nous venons de l'écrire, le « Marais » est de plus en plus cultivé depuis la dernière guerre. C'est presque toujours le fait de gros cultivateurs de la bordure du plateau Cauchois qui ont loué ou acheté d'importantes surfaces et qui viennent avec leurs machines, « tâter » les possibilités de cette terre jusqu'ici enherbée.

Ces possibilités sont le résultat :

1° des facteurs de sol, texture et richesse en éléments nutritifs que nous venons de décrire ;

2° des facteurs topographiques et de microclimat ;

3° des facteurs économiques et personnels.

Les facteurs topographiques sont à la fois favorables et défavorables.

Un avantage est l'horizontalité des champs. Sur environ 4 200 ha, l'altitude oscille autour de 4 m avec des chemins empierrés côté Seine et côté falaise à 5 m pratiquement toujours hors d'eau.

Par contre quelques points bas descendent à 3 m et sont ennoyés plus ou à moins longtemps en hiver.

La plus grande surface à 4 m est utilisable presque toute l'année, mais il y a toujours un risque d'asphyxie pour les cultures passant l'hiver (blé d'automne) ou une culture à récolte tardive (maïs grain).

Dans ces conditions des différences de 2 ou 3 décimètres peuvent avoir une répercussion considérable. Ce n'est que par l'observation directe et surtout par des essais malheureux que le cultivateur peut se faire une opinion sur la possibilité de réussir.

Le gros problème, comme dans tous les Marais bordant la Seine, est d'assurer l'écoulement de l'eau de pluie ou d'une forte marée. C'est la question d'entretien des fossés. Soit par négligence (Marais communaux) soit par disparition ou cherté de la main-d'œuvre, cet entretien avait été abandonné depuis de nombreuses décades.

Aujourd'hui, les fossés sont envahis par les racines des saules qui les bordent ce qui complique énormément le travail de remise en état.

Des agriculteurs importants des Marais de Lillebonne se sont associés pour posséder en commun une pelleteuse à chenilles, qui peu à peu, quoique difficilement, dégage les canaux. Étant donné que dans l'ensemble, le sol est peu argileux, on espère que l'assainissement finira par être satisfaisant.

Le microclimat a comme avantage d'être relativement doux, à cause de la basse altitude et de l'ouverture sur le fleuve, mais il est humide en hiver et parfois très sec en été. Quand le plan d'eau descend rapidement (terres assez filtrantes) il faut un certain temps pour que les racines le rattrapent, si elles le peuvent. Les prairies risquent assez facilement de souffrir de la sécheresse.

Les facteurs économiques sont d'une part assez favorables. En effet, la difficulté de cultiver un marais et la dégradation des prairies due au colmatage des canaux avait rendu la location ou l'achat de ces terrains assez facile pour des cultivateurs du plateau cauchois. Plusieurs d'entre eux ont pu constituer des ensembles d'une cinquantaine d'hectares d'un seul tenant, par exemple 400 m de largeur sur la Seine et 1 200 m de profondeur. Malgré quelques fossés, on peut donc y utiliser largement les machines.

Mais s'il existe quelques fermes établies en marais, plusieurs exploitants modernes font descendre leurs engins de leur ferme de plateau. Il en résulte une grosse perte de temps et une usure accrue, surtout si, comme le cas est fréquent en Seine-Maritime, le temps instable oblige à cesser momentanément les travaux.

Ces retards sont non seulement coûteux mais risquent de compromettre le semis ou la récolte, d'où de grosses pertes possibles.

A cela il faut ajouter la remise en état des fossés, indispensable pour se rapprocher de la culture normale et la nécessité de forcer la fumure P. K. dans beaucoup de parcelles.

Enfin, la présence d'une forte quantité de calcaire peut gêner certaines cultures, comme celle de la pomme de terre qui devient facilement galeuse, avec perte de valeur marchande.

En résumé, la culture en Marais reste présentement difficile, avec parfois des réussites spectaculaires en année favorable (colza et blé ou céréales secondaires de printemps, maïs...) mais aussi de gros échecs.

Il est certain qu'une meilleure connaissance des terroirs permettant de choisir les meilleurs possibilités culturales et la remise en état des fossés facilitera les choses.

Par ailleurs, certaines parcelles près des falaises autrefois gorgées d'eau, deviennent cultivables à la suite des forages des puits d'usine.

Enfin, la proximité de la Seine permettrait d'installer un arrosage d'été relativement peu coûteux.

Rotation actuelle des cultures

Il n'y a pas d'assolement à proprement parler.

Après une défriche de prairie, l'exploitant cultive généralement 2 ou 3 ans sans engrais ou tout au moins sans azote.

Il fait du blé d'automne sur les points les plus hauts ou du blé de printemps, ou de l'orge.

Le colza de printemps a eu une certaine faveur, d'autant plus qu'il a été assez indemne de parasites.

Cette première mise en culture peut fournir 50 q/ha de blé, 35 q d'orge ou 30 à 35 q de colza.

La betterave fourragère et les choux fourragers sont également à l'honneur.

L'avenir des cultures dans le marais

Au fur et à mesure de l'exploitation, on constarera une baisse de la matière organique qui pourra devenir gênante dans ce milieu parfois très filtrant. On sera donc donc amené à faire des prairies temporaires de plus ou moins longue durée. Elles auront une chance de bien réussir grâce au travail du sol, à une bonne fumure de fond et à l'existence de souches modernes d'herbes de grande valeur.

Par ailleurs, si se réalise l'assainissement par remise en état des fossés, conjugué de préférence avec l'établissement de vannes antimarée, la culture presque normale, avec céréales d'hiver ou colza d'hiver pourra devenir rentable. De toute façon, les cultures de printemps seront possibles : blé, céréales secondaires, maïs, colza, légumineuses fourragères et pommes de terre, surtout si des variétés résistantes à la gale commune se font jour. Également betteraves fourragères, choux fourragers, etc. Bref, un assez grand éventail de cultures.

Il sera intéressant de faire le point dans 5 ou 6 ans. Grâce aux nombreuses analyses bien repérées — en coordonnées LAMBERT — de la Station agronomique de Rouen, il sera facile de discerner les tendances dans la fertilité des sols et d'en déduire des directives de conduite des façons culturales et de la fumure.

La culture sur alluvions anciennes

Les alluvions anciennes, sablo-caillouteuses, plus ou moins acides, pauvres en matières organiques et généralement en tous éléments nutritifs, ont toujours été plus ou moins cultivées, ou sont restées en bosquets ou en maigres pacages dans le endroits les plus déshérités.

Elles sont un peu comparables, en ce sens, aux alluvions anciennes du méandre de Duclair précédemment décrites (JOUIS, 1959).

Contrairement aux alluvions modernes, remarquablement aplanies par la remontée progressives de la mer post-wurmienne, les alluvions anciennes sont sillonnées de petits vallons, secs en été mais pouvant écouler l'eau des grandes pluies d'hiver dans les années humides.

L'altitude du rebord du talus crayeux, côté marais, varie de 5 à 6 mètres au Mesnil de Lillebonne, à 50-60 mètres à l'extrémité est de Norville.

Sur ce rebord de talus, le placage d'alluvions anciennes est très mince, quelques décimètres, mais c'est la zone habitée, sur deux ou trois cents mètres de largeur.

La limite nord peut être située sur la ligne de niveau de 50 m à la base d'une seconde suite de falaises menant au plateau de limon, débutant vers 100 mètres d'altitude avec l'argile à silex pour atteindre le vrai limon vers 120 mètres.

La plus grande largeur de ces alluvions anciennes se trouve à peu près sur le méridien de Vieux Port. Elles s'étalent alors sur un peu plus de 2 km.

Le fond des vallons secs (voir profil 10 F) peut rester assez humide, bien que l'argile ne soit pas très forte (8 à 12 p. 100) ce qui permet de bonnes récoltes en cultures usuelles, blé, betteraves, fourrages.

Mais dès que l'on s'élève de quelques mètres sur les pentes de ces petits vallons la sécheresse reprend ses droits sauf en année humide et avec des pluies bien réparties.

Sur les replats, généralement très caillouteux, et pauvres, les récoltes dépendent encore plus de la pluviosité de l'année et aussi des engrais et du fumier. Malheureusement, ce dernier est peu important car les récoltes sont faibles. Par ailleurs, l'arrosage par aspersion serait trop coûteux à installer.

Autrefois, des cultures de primeurs, comme celle de la pomme de terre, pouvait avoir une certaine place car le sol léger s'échauffe vite mais les facilités de transport à partir des régions spécialisées, notamment de la Bretagne, font que cette spéculation ne peut maintenant qu'être très réduite.

En résumé, l'avenir agronomique de ces terrains reste, sauf exceptions, limité. Heureusement, une compensation attend les propriétaires par l'extension de l'urbanisme et notamment le développement des quartiers résidentiels pour les nombreuses usines qui s'installent à Notre-Dame-de-Gravenchon et à Lillebonne.

L'agronomie n'interviendra plus alors que pour la création de jardins potagers et de gazons, ce que l'on pourra résoudre par l'apport de limon du plateau tout proche renforcé au besoin par du terreau tourbeux tiré du marais en contrebas.

CONCLUSION

La conclusion de ce second mémoire sur les terroirs de la Vallée de Seine sera courte car une vue d'ensemble sera plus intéressante quand nous aurons fourni les caractéristiques des parties humifères de la vallée.

Nous ferons donc simplement quelques remarques comparatives.

A la limite de l'estuaire et sur la rive droite où se situe cette étude on note quelques différences par rapport aux terrains du méandre de Duclair.

Tout d'abord une grande proportion d'alluvions modernes très récentes sont en sables calcaires filtrants, provenant en partie du déversements de sables de dragage du fond du fleuve.

C'est ensuite l'absence de tourbe en surface, sauf si l'on remonte dans la vallée de Lillebonne.

Les terrains « marécageux » au pied des falaises mortes n'étaient souvent que gorgés d'eau, d'où une végétation superficielle de joncs et carex.

Les profils riches en argile sont rares. Il s'agit sans conteste d'alluvions moins anciennement consolidées, c'est-à-dire plus fréquemment remaniées que celles déposées plus doucement à mi-chemin entre Tancarville et Rouen.

Ces sols jeunes, après avoir été exploités en prairies naturelles pendant de nombreuses décades, tendent à passer en labours. Nous avons vu que cela présente des avantages et des inconvénients, ces derniers étant surtout liés à la présence d'eau en hiver remplacée par une sécheresse possible en été.

Néanmoins, sous réserve de sérieuses connaissances agronomiques on peut prédire que la culture dans les marais sera rentable.

Il n'en est pas de même pour les alluvions anciennes sablo-caillouteuses des terrasses, qui, sauf en situations particulières, ne fourniront jamis que de faibles récoltes. A notre époque elles risquent de perdre tout intérêt économique.

Heureusement le rapide développement du complexe d'usines de la Basse-Seine valorisera ces terrains qui tendent à passer dans la zone résidentielle.

Reçu pour publication en octobre 1961

SUMMARY

THE SOILS AND AGRICULTURE OF ANCIENT AND RECENT ALLUVIA IN THE LILLEBONNE REGION (LOWER-SEINE VALLEY)

The Lower-Seine valley, in the Lillebonne region, shows the same general characteristics as the bend of Duclair does, but the nearners of the sea and large-scale dykeing affected the surface and composition of the recent sandy and calcareous alluvia.

The alluvia do not contain coarse sand of 0,2 - 2 mm particle sofe, and the fine sand (1/3 of which is of calcareous nature) is distributed between 20 - 100 μ ; they generally contain little clay, especially on the river banks and rarely at any greater depth, making drainage by evacuation-trenches possible. On the other hand, drought may easily occur during the summer.

The lime content is of the order of 30 p. 100 throughout the profite, leading to a reaction of nearly pH 8. The humuous layer is generally thin. The surface layer of recent alluvia is generally several metres deeps and exposure of peat only occurs in the Lillebonne valley which is outside the sector surverged.

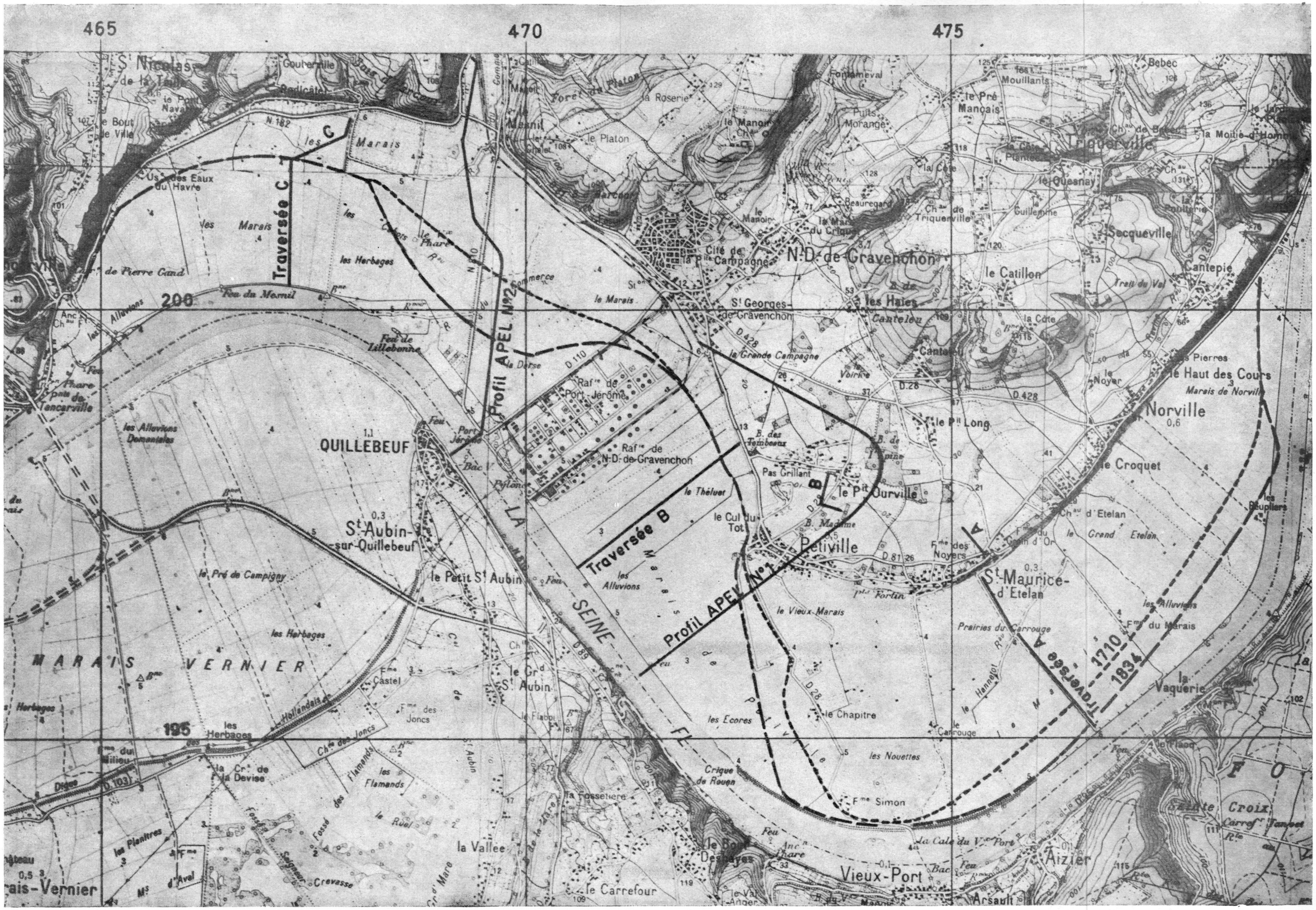
Once under grassland, these soils are increasingly put to cultivation.

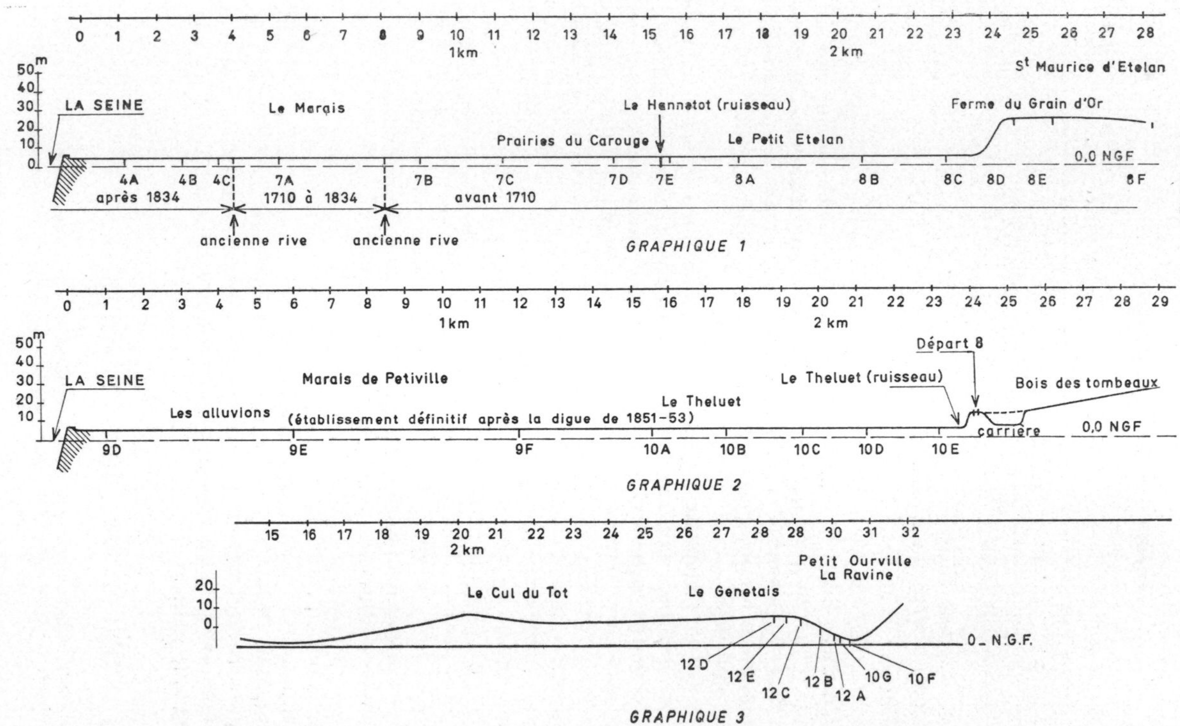
The ancient alluvia of sandy and gravelly nature are overbying the slopes or calcareous crusts (cénomanien) ; they are acid, poor in clay and organic matter and contain little nutrients. They will disappear with the Spreading of the indusitral towns in the lower Seine.

ZUSAMMENFASSUNG

BÖDEN UND LANDWIRTSCHAFT DER ALTEN UND MODERNEN ALLUVIALBÖDEN DER GEGEND UM LILLEBONNE (TAL DER UNTEREN SEINE)

Das Tal der unteren Seine, in der Gegend von Lillebonne weist die gleichen allgemeinen Merkmale wie die der Seinekrümmung von Duclair auf, aber die Nähe des Meeres einserseits, eine grossangelegte Eindämmung andrerseits beeinflussten die Fläche und Zusammensetzung der modernen kalk-sandigen Alluvialböden.


465
470
475
200
195
Traversée C
Traversée B
Traversée A
Profil APEL Nº2
Profil APEL Nº1
1710
1834
QUILLEBEUF
St Aubin-sur-Quillebeuf
le Petit St Aubin
le Gd St Aubin
LA SEINE
MARAIS VERNIER
N-D-de-Gravenchon
St Georges-de-Gravenchon
Cité de la Pte Campagne
Raffie de Port-Jérôme
Raffie de N-D-de-Gravenchon
Petiville
le Pit Ourville
Pas Grillant
le Cul du Tot
St Maurice-d'Etelan
Norville
le Croquet
le Haut des Cours
Marais de Norville
Triquerville
Secqueville
Cantepie
le Catillon
les Hales
le Quesnay
Fontameval
Puits Morange
le Pré Manoir
Bebec
le Platon
la Roserie
Mesnil
St Nicolas de la Taille
Us des Eaux du Havre
les Marais
les Herbages
les Alluvions
Feu de Lillebonne
Feu du Mesnil
le Marais
la Grande Campagne
le Vieux Marais
les Ecores
le Chapitre
les Nouettes
Fme Simon
Crique de Rouen
Prairies du Carrouge
le Carrouge
les Alluvions
Fme du Marais
la Vaquerie
Vieux-Port
Aizier
le Bout Deshayes
le Carrefour
la Vallee
les Flamands
Fossé des Flamands
le Pré de Campigny
les Herbages
la Crx de la Devise
Crevasse
Marais-Vernier
les Peupliers
le Croquet
le Grand Etelan
la Fosseterie
le Noyer
le Pit Long
Cantelou
la Cote
Fme Castel
Fme des Joncs



Méandre de Vieux Port

GRAPHIQUE 1 : Traversée A — St Maurice d'Ételan.
GRAPHIQUE 2 : Traversée B — Petiville — Le Marais.
GRAPHIQUE 3 : Traversée B — Petiville — Les alluvions anciennes.

Diese enthalten keinen Grobsand (0, 2-2 mm) und der Feinsand, davon ugf 1/3 kalkhaltig ist, verteilt sich zwischen 20-100. Er ist im allgemeinen wenig tonhaltig, besonders am Flussufer, und auf alle Fälle nicht in der Tiefe, weshalb die Abtropfmöglichkeit, sofern die Ablaufgräben gut unterhalten sind. Hingegen macht sich die Trockenheit im Sommer leicht bemerkbar.

Der Kalkgehalt beträgt 30 p. 100 in der Dichte des Profils, mit einer pH-Zahl um 8. Der humose Teil ist gewöhnlich dünn. Die obere Schicht der modernen Alluvialböden beträgt mehrere Meter und torfiges Ausgehendes gibt es nur im Lillebonner Tal, ausserhalb des untersuchten Abschnitts.

Ehedem Wiesen, ist das Gelände heute mehr und mehr im Anbau.

Die alten, kieslig-sandigen Alluvialböden sind auf den Hang oder die kalkigen Hangebenen gedrückt (Cenomanien). Sie sind sauer, arm an Ton, Humus und an Nährstoffen. Sie vertragen immer weniger die konkurrenzfähigen Kulturen. Mit der Ausdehnung der Industriezone der unteren Seine werden sie allmählich verschwinden.

Почвы и агрикультура в древних и современных отложениях района Лиллебонна (Долина Нижней Сены).

Е. ЖУИ и М. Т. ЛЕКАШЁ. — Руан.

При техническом сотрудничестве Франсуазы МОРТЭН. — Руанская Агростанция.

Долина Нижней Сены в районе Лиллебонна имеет общие характерные черты с теми которые встречаются в излучине Дюклера, но, близость моря с одной стороны, и обширные предприятия запруживания с другой, повлияли и на площадь, и на состав современных песчано-известковых отложений.

Отложения эти не содержат крупного, от 0,2 до 2 мм песка, пески-же более мелкие, из которых приблизительно треть известкового происхождения, распределяются в величинах от 20 до 100 микронов. Пески эти в большинстве случаев содержат мало глины, особенно в прибережной полосе и во всяком случае редко на глубине, что и облегчает стекание вод, в особенности когда отточные рвы хорошо содержатся. Напротив — засуха легко ощущается летом.

На глубине профиля пески эти содержат около 30 % извести, — откуда кислотность приближающаяся к 8. Слой содержащий гуммус-почти всегда не велик. Поверхностный слой современных отложений насчитывает несколько метров толщины и торфяные обнажения находятся только вне изследованных секторов, в долине Лиллебонна.

Употреблявшиеся прежде под луга почвы эти все более и более возделываются.

Что-же касается древних песчано-каменистых отложений, то, нанесены они на склоны или на известковые площадки (кеноманьен). У них кислая реакция, они бедны глиной и гуммусом, и мало обеспечены элементами питания. На них удаются культуры все менее и менее выгодные и они вскоре полностью будут застроены индустриями Нижней Сены расширяющими городские зоны.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNE P., 1945. Sur le dosage rapide du carbone organique des sols. *Ann. agron.*, 161.

APEL, 1905. Profils géologiques et notes archéologiques intéressant la région comprise entre Lillebonne et Quillebœuf. *Bull. Soc. Amis Sci. Nat.* Rouen, 439, **4**, 451.

BRIOUX Ch., JOUIS E., 1942. Les alluvions anciennes et modernes de la vallée de Seine. *Ann. Agron.*

DARCEL, 1857. Les alluvions des fleuves qui débouchent dans la Manche. *Ann. Ponts et Chaussées*, 109.

DEMOLON et BASTISSE, 1954. Sur la dispersion des colloïdes argileux — Application à leur extraction. *Ann. agron.*, 5.

HEDIN L., 1942. Recherches sur la végétation des alluvions de Basse-Seine. *Ann. agron.*

JOUIS E., LECACHEUX M. Th., 1956. Le Pays d'Ouche. *Ann. agron.*, 503-506.

JOUIS E., LECACHEUX M. Th., CAUCHY F., 1959. Contribution à l'étude des terroirs de la vallée de Basse-Seine. — Les sols du méandre de Duclair. *Ann. agron.*, 661-712.

0	1	3	5	7	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
x	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m	n	o	p	q	r	s	t	u	v	w

Les sables siliceux sont divisés en 2 groupes de 3 classes dont les limites sont : sables fins : 20-50-100-200 μ, sables grossiers : 0,2 — 0,5 — 1 — 2 mm. Les lettres de l'index se suivent dans cet ordre des classes. Elles indiquent le pourcentage des sables de la classe dans le total : sables fins + sables grossiers égalé à 100 %.

Méandre de Vieux-Port. Traversée A (Saint-Maurice-d'Ételan). Profil du graphique 1.

0,00	4A	4B	4C	7A	7B	7C	7D	7E	8A	8B	8C	8D	8E	8F
10								waa/xxx	wca/xxx	wba/xxx	wcb /bbb	pfg/bdb	kfg/ged	lfg/gdc
	mmb/axa	nma/axx	ola/aaa											
				vda/aaa	ufa/xxx	wba/aax	wca/xxx	wda/aax						
20									vda/aax	wbx/aaa		mfg/gdc	nef/gbd	lfg/gdc
											vbb/bax			
	kab/xxa					udc/cax						nff/fdc	keg/ged	mfg/fdc
30		ilj/axx									vbb/bax			
			okb/axa	wca/xax	vea/xxx		wca/aax	wca/aax		tga/aax				
									ufa/aaa			off/fdc		mfg/gcd
40	kpb/axx	gsc/axa				udb/abx								
			irb/aax	vdx/xxx	ria/xxx		wdx/xxx				wba/aax			
50		gtb/axa				wca/xxx				ufx/axx				mfg/gcd
	gsb/axx								vea/axx					
60			hrd/axx	tga/xxx	ria/aax			wbx/xxx			sha/aax			
							vea/xxx			ufa/xxx				
	gsa/axx	gjm/axx												
70						tfc/bax			ria/xxx					
			irb/axx	ufx/xxx										
					ria/xxx		vbx/axx							
80	img/axx							wbx/xxx						
		kkj /xxx							sha/xxx					
			ira/axx								qib/axx			
90				vda/axx	qia/aax	sgc/bxx	wba/xxx	vda/axx		wba/xxx				
1,00	hsa/axx	hmi/xxx		vda/axx				wca/xxx						
			frf/xxx		koc/axx	okb/cbx	wca/xxx			vea/xxx				
10		jki/aax												
											ufa/xxx			
	ira/xxx			nmb/axx				wbx/xxx		vea/xxx				
20						pjb/axx	tfa/xxx							
			hnh/xxx		koc/axx									
30				pka/aax				wca/xxx						

Méandre de Vieux-Port. Traversée B (Petiville) Le Marais. Profil du graphique 2.

0,00	9D	9E	9F	10A	10B	10C	10D	10E
10				ola-aax	nmb-aax	sgb-aaa	sga-aaa	rha-aaa
	pkb-xxx	ufa-xxx	bme-xxx					
20				nmb-aax	nmb-aax	sha-aax	rha-abx	qib-cax
30						pkb-axx	koc-axx	
	nma-xxx	vea-xxx	kpb-xxx	kob-aaa	lnc-aax			nmb-axx
40								
	mnc-xxx			nmb-axx	grf-aax	kod-axx		jpd-axx
50								
							ipe-axx	
		tfa-xxx	mnb-xax					
60	kod-axx			bnc-axx	fsf-axx			
						jpd-axx		hrc-axx
70		nmd-xxx	sga-xax					
							mma-aax	
	okb-axx				etf-axx			
80				kpa-axx		ete-axx		
		gmj-xxx						
90	nlb-xxx		ria-axx		frg-xxx			
							nlc-xxx	
				kpg-axx		iof-aax		dsf-axx
1,00								
	pka-axx				iqd-axx			
10				fsf-axx		iqc-axx	olb-axx	
20	kne-axx			fqg-axx	cue-axx			
30								
							gog-axx	

Méandre de vieux-port. Traversée B (Petiville.) Les alluvions anciennes. Profil du graphique 3.

0,00	10G	10F	12E	12D	12C	12B	12A	Surface du sol
10								
	jhg-iba	qhc-cca	ihg-idc	hhh-jcb	hhg-kca	hhg-jcb	fih-kca	
20								
30					hhh-icb			
			ihg-icc					
				hgg-jdc		igh-icb	ihg-iba	
40	jhh-hba	qhc-caa						
50			hhf-hdf		ghg-kcb		ihh-iba	
60				fhg-jgb		ihg-jcb		
							iig-ica	
70	jgg-icb	rhc-baa			hhf-kcb			
				ggg-idc		hhg-jcb		
80							iig-hba	
				ggg-idf				
					hgg-jcc	ihg-icb		
90		rib-aax						
	jhg-iba				hgg-jdc		kig-gba	
1,00						igg-idb		
10	jhg-iba						hig-jba	
		oid-daa				hgg-jed		
20								
30							fii-kba	

Ann. agron., 1961, **12** (5), 549-560.

631. 427. 3 : 635. 64

MISE AU POINT CONCERNANT L'APPLICATION DE L'ANALYSE FOLIAIRE A LA CULTURE DES TOMATES

H. BROESHART et G. C. REDLICH

Syndicat pour l'Amélioration des Sols et des Cultures, Gargenville (Seine-et-Oise).

SOMMAIRE

Cette étude compare les moyens de contrôle de la nutrition des plantes : tests rapides ou « tissue tests » d'une part, analyse de la matière sèche des feuilles d'autre part.

D'après les renseignements bibliographiques, on expose les facteurs de variation de composition minérale des feuilles de tomates, ce qui conduit à préciser les modalités de prélèvement.

Dans une dernière partie, quelques bases d'interprétation des résultats sont indiquées à partir d'exemples caractéristiques.

I. — INTRODUCTION

L'application de l'analyse foliaire, en tant que méthode de diagnostic pour la détermination des besoins en engrais minéraux est devenue de plus en plus importante depuis une dizaine d'années. En particulier les travaux de LAGATU, MAUME, PRÉVOT, BEAUFILS, BROESHART, WALLACE, NICHOLAS, BOULD et beaucoup d'autres ont démontré que l'analyse foliaire est une méthode sensible pour la détermination de l'état nutritif des végétaux. L'application pratique s'est dirigée surtout vers les cultures pérennes, parce que dans ce cas, il est relativement facile de standardiser la technique de l'échantillonnage. En plus, il est possible de suivre les résultats d'un conseil de fumure basé sur l'analyse foliaire. Habituellement les applications d'engrais sont données longtemps après le prélèvement de l'échantillonnage.

Pour les cultures annuelles, le problème est différent. L'analyse foliaire n'est pratique que si l'on peut déterminer l'état nutritif de la plante à un stade jeune du développement ; cette analyse doit pouvoir être suivie d'apports d'engrais pour corriger l'état nutritif de la plante pendant la saison même.

Dans le cas d'une monoculture, en l'absence d'une rotation de cultures différentes, la situation est plus favorable pour l'analyse foliaire parce que les apports d'engrais peuvent être effectués l'année suivant l'analyse foliaire.

Il est évident que les monocultures ne sont que des cas exceptionnels ; en général on aura à faire à une rotation de cultures différentes.

Pour une culture comme les tomates, les apports d'engrais pendant la période de croissance sont une règle plutôt qu'une exception. Pour cette culture, il est intéressant de contrôler l'état nutritif pendant la croissance et de corriger par des apports d'engrais.

Il existe deux méthodes différentes pour faire un diagnostic de l'état de nutrition.

a) la détermination dans la plante des minéraux qui ne sont pas encore organisés et qui se trouvent surtout dans le système de transport de la plante. Il s'agit alors d'une analyse de la matière fraîche (la sève). Dans la littérature, ces analyses sont souvent appelées des « tests rapides » ou « tissus tests » ;

b) la détermination dans la plante des minéraux déjà organisés. Dans ce cas, l'analyse se fait sur la matière sèche des feuilles.

Dans le premier cas, on détermine le « menu » de la plante à un moment donné ; dans le deuxième cas, on détermine ce que la plante a assimilé pendant une certaine période.

Dans les chapitres suivants, une comparaison sera faite entre les avantages et les inconvénients des tests rapides et de l'analyse de la matière sèche, en se basant sur des données de la littérature.

II. — ANALYSE DE LA SÈVE OU DE LA MATIÈRE FRAICHE (ou les tests rapides).

Une description détaillée de la méthode, ainsi que l'interprétation des résultats, est donnée par EMMERT (1942). Les pétioles des vieilles feuilles sont pris à des stades différents. L'extraction est faite immédiatement après le prélèvement de la feuille, à l'acide acétique à 2 p. 100. Un grand nombre d'échantillons ont été prélevés sur une série d'expériences de fumure en pleins champs et de culture sur sable pendant la période 1935-1942. En plus de la concentration des éléments dans le sol, la durée de la période d'éclairement, la température, l'insolation et l'évaporation avaient une influence notable sur la composition des pétioles. Ces effets étaient plus prononcés dans les pétioles jeunes. Pour cette raison les pétioles qui avaient atteint leur maturité furent choisis pour l'analyse.

Il est essentiel que l'extraction du matériel frais soit faite immédiatement après l'échantillonnage par un technicien spécialisé et sur place. Il est impossible d'expédier des échantillons frais à un laboratoire sans modifier considérablement les teneurs en éléments non élaborés. Les échantillonnages doivent être exécutés à intervalles fréquents. La variation de la composition chimique sera plutôt une fonction des conditions climatologiques du stade présent de développement de la plante. Cela a été montré par HAGIN et SHMUELI — (1960). Pendant la saison froide, les teneurs en nitrate sont basses.

Les teneurs sont plus élevées au début du printemps et diminuent quand la croissance des plantes est plus progressive.

D'après EMMERT, les relations entre les teneurs en éléments des pétioles et le rendement des tomates sont d'une nature curvi-linéaire.

L'analyse statistique des fonctions curvi-linéaires est possible quoique les calculs

soient compliqués. Cette complication peut être évitée en classant les données en groupes d'une même teneur en azote ou en phosphore. Pour chaque groupe les coefficients partiels de corrélation et de régression, sont calculés.

Ainsi, on obtient une idée de la relation entre l'azote dans la plante et le rendement pour des niveaux différents de phosphore. De la même façon, la relation entre la teneur en phosphore et le rendement pour différents niveaux de N peut être déterminée.

Le tableau 1 donne un résumé des résultats obtenus par EMMERT, qui forment la base du diagnostic foliaire par les tests rapides. Pour chaque stade de développement, il existe un niveau critique de N et P dans les pétioles.

TABLEAU 1

Composition critique de vieux pétioles pour des stades différents du développement en p. 100 *de la matière fraîche.* (EMMERT, 1942).
(acide acétique à 2 p. 100)

Élément	Stade	Teneur critique
N	Hauteur de la plante 30 cm.	NO_3 — N % = 0,10 -0,15
N	Pendant maturation.	NO_3 — N % = 0,07 -0,08
N	Maturation.	NO_3 — N % = 0,030-0,035
N	Avant maturation.	N % = 0,15 -0,20
N	Entre développement 1re et 4e grappe.	N % = 0,10
N	Après développement 4e grappe.	N % = 0,20 -0,25
N	Maturation finale.	N % = 0,10
N	Avant maturation.	N % = 0,15
N	Pendant maturation.	N % = 0,05 -0,08
N	Pendant maturation	N % = 0,08 -0,15
N	Maturation.	N % = 0,05 -0,10
P	Hauteur de la plante 30 cm.	PO_4 — P % = 0,02 -0,03
P	Pendant maturation.	PO_4 — P % = 0,035-0,040
P	Maturation.	PO_4 — P % = 0,030-0,035
P	Avant maturation.	P % = 0,010-0,015
P	Pendant maturation.	P % = 0,020
P	Avant maturation.	P % = 0,02
P	Pendant maturation.	P % = 0,04

Le tableau 2 montre les résultats de HESTER (1941) pour les tests rapides de tiges. La teneur critique en azote dépend aussi de la teneur en phosphore, comme il est montré par EMMERT (1949). Il existe un équilibre entre les teneurs en azote et phosphore dans les pétioles. Pour des teneurs élevées en phosphore, les teneurs critiques d'azote seront aussi plus élevées.

TABLEAU 2

Composition critique des tiges exprimées en p. 100 *de la matière fraîche*
(Tampon d'acétate) HESTER, 1941.

Elément	Teneur critique
N	NO_3 — N % = 0,008 -0,249
P	P % = 0,0043-0,0086
K	K % = 0,166 -0,249

En ce qui concerne les éléments N et P, l'interprétation des tests rapides pourrait être basée sur les résultats de EMMERT. Pour le diagnostic de l'état nutritif du K, du Ca et Mg, les données de la littérature sont encore insuffisantes comme base de référence.

III. — ANALYSE DE LA MATIÈRE SÈCHE

Le principe de cette méthode est basé sur l'observation faite par plusieurs chercheurs, qu'il existe une composition normale ou « optimale » de la plante pour chaque stade de développement. Cette composition normale varie très peu, pourvu que le milieu fournisse les éléments nutritifs en quantités suffisantes requises par la plante. Quand un ou plusieurs éléments ne sont pas présents en quantités suffisantes, la composition de la plante change d'une façon caractéristique.

Il est impossible d'analyser des plantes entières dans le cas de la culture des tomates, parce qu'un nombre élevé de plantes (10-20) est requis pour constituer un échantillon moyen. Ou alors un échantillonnage régulier laisserait un champ non homogène. L'échantillonnage sera donc réduit au prélèvement d'une feuille par plante. On choisit de préférence des feuilles parce que c'est là que les éléments de la sève sont organisés ; ceci est le contraire des tests rapides, où l'on prélève surtout des organes comme les tiges et les pétioles qui servent au transport de la sève.

Un certain nombre de facteurs ont une influence sur la composition chimique des feuilles de tomate. Dans les chapitres suivants, ces facteurs seront discutés en détail.

1° *Époque de l'échantillonnage.*

Il est évident que l'échantillonnage doit être exécuté au moment où la composition de la plante est susceptible d'indiquer un état nutritif non favorable. D'autre part, les quantités d'éléments requises par la plante le premier mois suivant le repiquage, sont petites en comparaison des quantités d'éléments absorbés pendant les deuxième et troisième mois. La figure 1 d'après HESTER (1938) montre les besoins en élément nutritifs de la tomate en fonction de l'âge de la plante. Il sera nécessaire, d'après cette figure, d'exécuter l'échantillonnage au moins pendant deux époques différentes, par exemple à la fin du premier et du deuxième mois.

2° *Le choix de la feuille.*

La feuille à prélever pour l'échantillonnage sera déterminée par l'âge physiologique de la feuille, l'âge de la plante et l'aptitude à indiquer des carences minérales à des stades jeunes de développement. Nous discuterons ces facteurs plus en détail.

a) *L'âge physiologique de la feuille.*

JOHANNESSON (1948) faisait une étude systématique de la composition chimique de différentes parties des feuilles de tomates en fonction de l'âge de la feuille.

Il montrait que la teneur en magnésium et calcium augmente avec l'âge des feuilles, tandis que le potassium reste à peu près constant. Les teneurs en calcium et magnésium sont plus élevées dans les parties basales des feuilles et le potassium est plus élevé à l'extrémité des feuilles.

Les mêmes résultats furent obtenus par PHILLIPS, SMITH et DEARBORN (1934). Les vieilles feuilles ont une teneur plus élevée en Ca et en Mg que les jeunes feuilles. K et P sont plus élevés dans les jeunes feuilles.

Il est évident qu'une comparaison entre des plantes n'est possible qu'en comparant la composition chimique des feuilles d'un même âge physiologique.

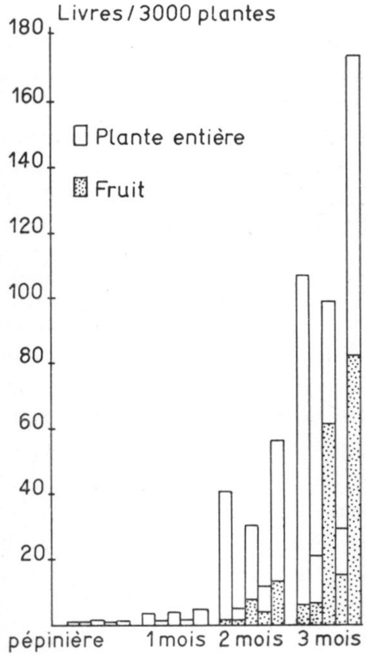


FIG. 1. — *Les quantités d'éléments absorbés à des stades différents de développement. de gauche à droite : CaO, MgO, N, P_2O_5, K_2O.*

b) *L'influence de l'âge de la plante sur la composition d'une feuille particulière.*

L'influence de l'âge de la plante sur la composition d'une feuille particulière, c'est-à-dire une feuille d'un certain âge physiologique, n'a pas été étudiée de façon systématique.

A plusieurs reprises, des chercheurs ont déterminé l'évolution de la composition chimique moyenne d'une plante entière, en fonction de l'âge de la plante.

En général, on peut voir que cette composition moyenne, en fonction de l'âge, montre la même tendance que la composition chimique des feuilles dont l'âge physiologique augmente. Il est évident que le pourcentage relatif des feuilles jeunes diminue au fur et à mesure de la croissance de la plante.

La composition moyenne de la plante entière en fonction de l'âge, a été déterminée par HESTER (1938). Après le premier mois, donc après le repiquage en champ, les teneurs moyennes en calcium et magnésium augmentent tandis que l'azote et à un moindre degré, le phosphore et le potassium diminuent avec l'âge de la plante. Ceci confirme les résultats de JOHANNESSON et PHILLIPS et ses collaborateurs, qui

comparaient la composition chimique des feuilles d'âges physiologiques différents (voir a).

THOMAS (1940) suivait la composition de la cinquième feuille (à partir de la base) de la plante : cette feuille était prélevée à trois stades de développement de la plante. Il est évident qu'une telle comparaison, ne peut pas servir pour la détermination de l'influence de l'âge de la plante sur la composition d'une feuille particulière.

En effet, aux trois stades de développement de la plante, les 5[e] feuilles à partir de la base ne sont plus des feuilles d'un même âge physiologique, mais des feuilles qui sont chaque fois plus âgées.

Pour cette raison, il est logique que THOMAS puisse établir que la somme de N + P + K de la 5[e] feuille diminue avec l'âge croissant de la plante. C'est la même tendance qu'on trouve dans des feuilles d'âges croissants. Aussi l'observation de THOMAS que la teneur en N diminue relativement plus rapidement que les teneurs en P et K au cours du vieillissement, est en concordance avec les résultats de HESTER pour les feuilles d'âges physiologiques croissants.

Une autre question se pose. Il est impossible d'établir la cause d'un changement de composition chimique d'une feuille particulière en fonction de l'âge de la plante.

Cela peut être l'âge, mais il est aussi possible que certains éléments dans le milieu nutritif ne soient plus présents en quantités suffisantes nécessaires à la plante. HESTER montrait une diminution de la teneur en azote dans le courant du troisième mois. De même MALCOLM (1959) trouvait dans certains cas une diminution de la teneur en azote dans la troisième feuille (à partir des feuilles jeunes), après la deuxième récolte. En même temps les teneurs en P et K dans la troisième feuille augmentaient. Il est bien possible qu'après la deuxième récolte, la plante devient déficiente en azote.

Contrairement à ce qui a été trouvé par HESTER pour la plante entière et par THOMAS pour la 5[e] feuille de la base, on peut s'attendre à ce que la composition chimique d'une feuille qui a un âge physiologique déterminé, ne change pas beaucoup pendant la période de croissance normale de la plante, pourvu que le milieu nutritif ne devienne pas un facteur limitant.

Les données de MALCOLM (1959) peuvent illustrer cette supposition. Les chiffres se rapportent à la troisième feuille, à partir du sommet, donc toujours aux feuilles d'un même âge physiologique. Les échantillons furent pris avant et après la première récolte des tomates dans toutes les parcelles d'essai de fumure N-P-K pendant les années 1954-1955 et 1955-1956.

Le rapport entre N, P et K dans les échantillons provenant des meilleures parcelles était identique pour les deux périodes, et s'élevait à 56-63 p. 100 N, 3.0-3.7 p. 100 P et 30-40 p. 100 K (pourcentage de la somme N + P + K où les teneurs sont exprimées en p. 100 de la matière sèche).

On peut donc conclure que la composition des plantes entières se modifie en fonction de l'âge de la plante ; pour une feuille d'un certain âgephysiologique, cela n'est pas le cas pourvu que la croissance de la plante soit normale.

c) *L'influence de la saison* (*climat*).

OWEN (1931) étudiait l'influence de la saison sur la composition chimique des feuilles pour un certain nombre d'essais de fumure.

La variation de la teneur en azote, en fonction de l'année était identique pour

tous les traitements. Pour les teneurs en K et P, cela n'était pas toujours le cas. Néanmoins, il n'est pas possible d'établir s'il s'agit d'une influence directe de la saison ou d'une interaction entre saison et conditions nutritives dans le sol. Il est connu que l'influence de périodes de pluie ou de sécheresse sur la composition de la solution du sol est grande. On pouvait donc s'attendre à ce que le climat ait une influence directe sur la composition du milieu nutritif et en conséquence une influence indirecte sur la composition minérale des feuilles.

d) *Sensibilité aux carences en macro-éléments.*

Le critère qui décide de la feuille à choisir est déterminé par la relation entre l'élément dans la feuille et le rendement de la plante. De préférence on choisira une feuille qui est sensible à une carence à un stade jeune de la plante. On doit considérer non seulement l'élément déficient mais aussi les teneurs en autres éléments, modifiées du fait de cette carence.

Les données de PHILLIPS, SMITH et DEARBORN, montrent la même tendance dans des feuilles d'âges différents en cas d'une carence potassique.

THOMAS et MACK (1941) employaient la cinquième feuille de la base pour suivre la composition chimique en fonction des applications de N, P et K. Ils obtenaient des corrélations très nettes entre les traitements et les rapports entre N, P et K dans cette feuille.

MALCOLM (1959) prélevait la troisième feuille (à partir des plus jeunes feuilles) dans plusieurs séries d'essais d'engrais. Il montrait une relation étroite entre la composition de cette feuille et les traitements de N, P et K.

On peut conclure que les données de la littérature ne montrent pas une différence nette entre les feuilles d'âge physiologique différent quant à leur aptitude à servir de base pour un diagnostic foliaire.

Le seul point important est la composition de feuilles d'un même âge physiologique.

3° *L'interprétation de l'analyse foliaire.*

La base de l'interprétation est la composition « normale ou optimale ». Une carence en un élément entraînera des déviations caractéristiques de la composition normale.

Il n'est pas possible d'établir un niveau critique pour chaque élément, par analogie avec les chercheurs qui appliquent les « tissue tests ». Cela peut être illustré par un cas rapporté par MALCOLM (1955) concernant la teneur en azote en cas d'une carence extrême de cet élément (tableau 3). La croissance rapide induite par une faible application d'azote, dilue l'azote dans la plante. Par conséquent les conditions extrêmement déficientes correspondraient à une teneur en azote presque normale, tandis qu'une carence moins aiguë montrerait des teneurs en azote très basses. Il est évident que seule la teneur en azote ne pourrait pas être un critère pour la détermination des besoins de cet élément par la plante.

En cas de carence extrême d'azote, d'autres critères seront requis.

Un diagnostic, basé sur le comportement d'un seul élément dans la feuille n'est pas facile pour une autre raison. Les teneurs en éléments sont exprimées en p. 100 de la matière sèche, or la teneur en matière sèche de la plante varie considérablement. Sous l'influence d'une variation climatologique comme l'insolation, l'évapo-transpi-

ration etc., la teneur en hydrates de carbone synthétisés dans les feuilles sera très différente. Les teneurs en éléments minéraux dans la feuille, exprimées en p. 100 de la matière sèche ne seront pas constantes non plus. Pour cette raison, il est difficile d'établir un « niveau critique » pour un élément particulier.

TABLEAU 3

La composition de la 3e feuille en cas d'une carence en azote (MALCOLM, 1955).

Année	Fumure azotée lbs/acre	Composition chimique en % de M. S.					
		N	P	K	Ca	Mg	N/P
1954	0	3,33	0,40	3,6	2,2	0,52	8,3
	40	2,66	0,31	3,5	2,7	0,51	8,6
	80	2,74	0,25	3,9	2,2	0,45	11,0
	160	3,12	0,25	4,2	2,0	0,45	12,5
	320	3,63	0,22	4,2	2,0	0,45	16,5
1955	0	3,42	0,30	2,4	2,5	0,45	11,4
	40	2,90	0,24	2,3	2,7	0,45	12,1
	80	2,81	0,22	2,2	2,4	0,43	12,8
	160	3,50	0,23	2,3	2,3	0,43	15,2
	320	3,93	0,23	2,3	2,1	0,41	17,1

Il est plus facile de baser le diagnostic sur les rapports existants entre les éléments dans la feuille. Ces rapports sont indépendants de la teneur en produits d'assimilation comme les carbo-hydrates.

Souvent les rapports entre trois éléments sont représentés dans des diagrammes triangulaires en exprimant les teneurs de ces éléments en p. 100 de leur somme. De cette façon THOMAS et MACK étudiaient l'équilibre entre N, P et K de la cinquième feuille de la base, en fonction des applications d'engrais. Employant les chiffres obtenus par MALCOLM pour la troisième feuille, on peut exprimer les teneurs en N, P et K en p. 100 de la somme de N + P + K.

Ainsi on peut déterminer les rapports optimaux entre ces éléments dans la troisième feuille. Les résultats de deux expériences N, P, K, pendant les années 1954-1955 et 1955-1956 ont été comparés. Les rapports entre les trois éléments pour les parcelles ayant la production la plus élevée, correspondent aux chiffres suivants ; pour l'échantillonnage avant la première récolte :

N 56-63 p. 100.
P 3,0-3,7 p. 100.
K 33-40 p. 100.

Pour un deuxième échantillonnage après la première récolte, les teneurs relatives sont :

N 58-63 p. 100.
P 3,1-3,8 p. 100.
K 30-36 p. 100.

Bien que les échantillonnages des deux expériences ne furent pas exécutés au

même stade de développement, les compositions chimiques des meilleurs traitements sont d'une grande concordance. Les chiffres de MALCOLM montrent qu'il existe un rapport optimal entre les éléments dans les feuilles d'un même âge physiologique. L'âge de la plante a peu d'influence sur cette composition normale.

Ce qui montre que pour faire un diagnostic foliaire, il faut connaître les déviations de la composition chimique normale pour les carences en N, P, K et Mg.

Une simplification du problème est déjà donnée par les résultats de HOMES et V. SCHOOR (1950-1952). Pour un grand nombre de végétaux ces chercheurs trouvaient que les variations d'assimilation des cations sont indépendantes des anions et inversement, quoique d'autres chercheurs aient trouvé une influence des cations sur les anions ou inversement.

Ces effets demeurent faibles, comparés aux influences des cations entre eux et anions entre eux. Pour le diagnostic d'une carence en N et P, on devrait donc suivre le rapport N/P ou N : P : S. Pour une carence en K et Mg on pourrait se baser sur l'équilibre de K, Ca, Mg ou de K, Ca, Mg, Na. La valeur de cette méthode peut être illustrée par quelques exemples trouvés dans la littérature.

La composition chimique en cas *d'une carence en azote* est donnée dans le tableau 3 (MALCOLM). Il est montré qu'une carence en N est accompagnée d'une réduction du rapport N/P. L'influence d'une carence en N sur la composition cationique est faible.

Une carence en phosphore est accompagnée d'une augmentation du rapport N P, comme il a été confirmé par plusieurs chercheurs. Pour les tomates, on trouve peu d'exemples typiques dans la littérature. Souvent la teneur en K augmente quand P est déficient.

Une carence en potassium est démontrée par les chiffres de PHILLIPS, SMITH et DEARBORN (1934), tableau 4.

TABLEAU 4

La composition chimique des feuilles de plantes normales et carencées en K (en p. 100 de la matière sèche).

(PHILLIPS, SMITH et DEARBORN, 1934).

Élément	Jeunes feuilles		Feuilles maturité		Feuilles vieilles	
	Normal	Déficient	Normal	Déficient	Normal	Déficient
Potassium	3,49	1,65	3,76	1,53	2,81	0,71
Calcium	1,75	1,93	3,63	4,39	6,03	6,70
Magnésium.........	0,68	0,62	1,21	1,43	1,95	2,28
Phosphore	0,81	1,13	0,82	1,28	0,78	1,27

Une carence en potassium fait diminuer la teneur en K et en même temps Mg et ou Ca augmente. La teneur en P peut aussi augmenter, quand K est déficient.

Une carence en magnésium provoque une diminution des teneurs en Mg et Ca tandis que la teneur en K monte (JOHANNESSON, 1951, tableau 5).

TABLEAU 5

L'analyse des feuilles en cas d'une carence de magnésium.
(JOHANNESSON, 1951).

Degré de la carence	% de la matière sèche		
	MgO	CaO	K_2O
Extrême	0,10	4,7	4 6
Moyenne	0,23	5,7	4,8
Normal	0,49	7,1	3,3

L'équilibre de K, Ca et Mg peut être démontré à l'aide d'un diagramme triangulaire. D'abord les teneurs sont exprimées en p. 100 de la somme de K + Ca + Mg (fig. 2).

La composition optimale d'une certaine feuille est déterminée par l'analyse des échantillons provenant des meilleures parcelles des essais d'engrais et des meilleures plantations.

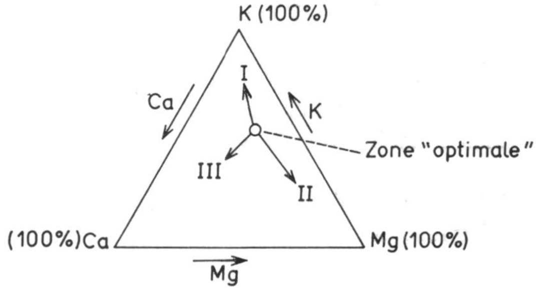


FIG. 2. — *I. Carence Mg.*
II. Carence K.
III. Carence K + Mg.

Une déviation dans la direction I indiquera une carence en Mg ; dans la direction II se trouve la zone d'une carence potassique. Une carence en K et Mg augmentera la teneur en Ca très fortement et en conséquence la zone d'une carence simultanée de K et Mg se trouve dans les directions de III. D'après les chiffres de MALCOLM, une carence en N entraînera un déséquilibre par rapport à la composition optimale dans la direction II ou III. Une carence en P déplacera la composition cationique légèrement vers I. Toutefois, ces effets sont petits, comparés aux effets de carence en K ou Mg.

IV. — CONCLUSION

D'après les résultats obtenus par différents chercheurs, deux méthodes peuvent être appliquées à un diagnostic foliaire pour la culture des tomates.

La première méthode est basée sur la détermination des éléments non élaborés par la plante. Immédiatement après le prélèvement des échantillons (d'habitude pétioles ou tiges), la matière fraîche est extraite par un acide dilué, comme l'acide

acétique à 2 p. 100. On acquiert ainsi une idée de la situation présente et de la disponibilité des éléments dans le sol. Les échantillonnages doivent être exécutés à intervalles fréquents. La variation de la composition chimique sera plutôt une fonction des conditions climatologiques à un stade donné du développement de la plante.

Il est essentiel que l'extraction du matériel frais soit faite immédiatement après l'échantillonnage par un technicien spécialisé sur place. Il est impossible d'expédier des échantillons frais à un laboratoire sans modifier considérablement les teneurs en éléments non élaborés.

L'interprétation est basée sur les « niveaux critiques » dans la sève.

La deuxième méthode comporte l'analyse des éléments dans la matière sèche. En général, un ou deux échantillons de feuilles d'un même âge physiologique, prélevés à des stades de développement bien déterminés, suffiront pour faire un diagnostic de l'état nutritif de la plante.

Le diagnostic est basé sur la composition « normale » d'une feuille d'un âge physiologique connu. Pour les carences en macro-éléments, les déviations de cette composition optimale sont caractéristiques et sont à la base du diagnostic foliaire.

En général une carence en azote entraînera une forte réduction du rapport N P, tandis qu'une carence en phosphore augmentera ce rapport. Les carences en K, Mg, ou K + Mg peuvent être mises en évidence sur des diagrammes triangulaires où sont portés les pourcentages relatifs de K, Mg et Ca. Elles se traduisent par un déplacement caractéristique du point représentatif par rapport à la « zone optimale ».

Reçu pour publication en avril 1961.

SUMMARY

PERFECTION OF FOLIAR ANALYSIS AS APPLIED TO TOMATO CULTURES.

The rapid test and tissue test applied in the foliar analysis of tomatoes are compared, for the determination of non-metabolised elements in the plant and of nutrients subject to variations according to weather conditions and nutrients in the dry matter.

Sampling has to be done on leaves of physiologically well defined age (third leaf from the top) and evaluation of results is made by reference to the composition of a normal leaf of the same physiological age.

Deficiencies of major nutrients result in differences in mineral composition, and various means of their representation are studied.

ZUSAMMENFASSUNG

RICHTIGSTELLUNG, DIE ANWENDUNG DER BLATTANALYSE AUF TOMATENKULTUREN BETREFFEND

Die beiden, auf Tomaten anwendbaren Methoden der Blattanalyse werden einem Vergleich unterzogen : Schnell- oder Gewebeteste, welche die durch die Pflanze noch nicht elaborierten und Änderungen besonders den klimatischen Bedingungen unterworfenen Bestandteile, feststellen ; und Analyse der Bestandteile der Trockenmasse ; die Probe erfogt auf Blätter mit ganz bestimmtem physiologischen Alter (am Besten das dritte Blatt von oben).

Die Beurteilung geschieht durch Vergleich mit der « Normal » Zusammensetzung eines physiologisch gleichaltrigen Blattes.

Die Mängel an Hauptnährstoffen ziehen Abweichungen in der mineralischen Zusammensetzung nach sich ; es werden verschiedene Darstellungsmittel untersucht.

О применении листового анализа в культуре помидоров.

Х. БРЁШАР, Г. РЁДЛИХ (Гарженвиль).

Сравниваются два метода листового диагноза применяемого в культуре помидоров : быстрые пробы, или пробы тканей для определения элементов подверженных изменениям вызванных главным образом климатическими условиями и не вырабатываемых растением, и анализы элементов заключенных в сухой массе; отмечается что вытяжки должны быть взяты из листьев находящихся в стадии совершенно определенного физиологического развития (из третьего листа считая от вершины — в данном случае).

Сравнение делается по отношению к « нормальному » составу листа находящемуся в той-же стадии физиологического развития.

Недостаток в главных элементах приводит к отклонениям от нормального минерального состава : разсматриваются различные способы графических представлений.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BROESHART H., 1956. The application of foliar analysis to oil palm cultivation. I. Sampling technique. *Trop. Agric.*, **33**.

CAROLUS R. L., 1949. Calcium and potassium relationships in tomatoes and spinach. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **54**.

EMMERT E. M., 1942. Plant tissue tests as a guide to fertilizer treatments of tomatoes. *Kentucky Agric. Expt. Sta. Bull.*, nº 430.

EMMERT E. M., 1949. Tissue analysis in diagnosis of nutritional troubles. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sc* **54**.

GOODALL D. W., GREGORY F. G., 1947. Chemical composition of plants as an index of their nutritional status. *Imper. Bur. Hort. Plant. Crops, Techn. Com.*, nº 17.

HAGIN J., SHMUELI E., 1960. Determination of available nutrients and fertilizer requirements of winter tomatoes in the Jordan Valley. *Quart. J. Natl. Univ. Inst. Agric.*, **10**.

HESTER J. B., 1938. The absorption of nutrients by the tomato plant at different stages of growth. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **36**.

HOMES M., 1950, 1951, 1952. L'alimentation minérale des végétaux. Notes 1, 2, 3. *Bull. Soc. Roy.Bot. Belg.*, **83**, **84**, **85**.

HOMES M., VAN SCHOOR G. H. J., 1952. L'alimentation minérale des végétaux. Note 4. *Bull. Soc. Roy. Bot. Belg.*, **85**.

JANSON G., BARTHOLOMEW R. R., WATTS V. W., 1934. Some effects of nitrogen, phosphorus and potassium on the composition and growth of tomato plants. *Univ. Arkansas Coll. Agric. Bull.*, nº 310.

JOHANNESSON J. K., 1951. Magnesium deficiency in tomato leaves. *N. Z. J. Sci. Technol.*, **33**.

MALCOLM J. L., 1955. Nitrogen experiments with potatoes and tomatoes on Marl soils. *Soil. Sci. Soc. Florida Proc.*, **15**.

MALCOLM J., 1959. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer on fruit yield and composition of tomato leaves. *Sub-Trop. Expt. Sta. Univ. Florida*, **7**.

OLLAGNIER M., 1953. *Oleagineux*, 8, doc.

OWEN O., 1931. The analysis of manurial treatment on the composition of tomato foliage. *J. Agric. Sci.*, **21**.

PHILLIPS T. G., SMITH T. O., DEARBORN R. B., 1934. The effect of potassium deficiency on the composition of the tomatoes plant. *Univ. New Hampshire Agric. Expt. Stat. Techn. Bull.*, nº 59.

PRÉVOT P., 1953. Engrais minéraux et oléagineux tropicaux.

SCHUFFELEN A. C., BOLT G. M., 1958. Ionic equilibria in soils. Verhandl. II. und IV. *Komm. Intern. Boden-Kundlichen Gesellsch.* Hamburg, **2**.

THOMAS W., MACK W. B., 1941. A foliar diagnosis study of greenhouse, tomato plant showing symptoms of streack disease. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **39**.

THOMAS W., 1940. Foliar diagnosis of differentially fertilized greenhouse tomatoes with and without manure. *J. Agric. Res.*, **60**,

THOMAS W., 1945. Present statue of diagnosis of mineral requirements of plants by means of leaf analysis. *Soil Sci.*, **59**.

Le Directeur-Gérant : M. L. CAGNAC.

Imprimerie BUSSIÈRE Saint-Amand (Cher), France. — 12-1-1962.

Dépôt légal : 1er trimestre 1962 Nº d'impression : 199.

Ann. agron., 1961, **12** (6), 561-571.

631. 415. 3 : 631. 67

LES PHÉNOMÈNES TEMPORAIRES DE SALINISATION DES SOLS IRRIGUÉS EN ALGÉRIE ET AU SAHARA.

P. SIMONNEAU

Section Agrologie, Service des Études scientifiques appliquées à l'Hydraulique, Alger.

SOMMAIRE

Dans les aires d'irrigation nouvellement aménagées en Algérie comme au Sahara, les premières manifestations de salinisation se produisent toujours dans les sols bordant les canaux d'irrigation.

Elles sont dues à une montée du niveau de la nappe phréatique saumâtre, qui est provoquée par la rupture de l'équilibre naturel existant dans les sols entre les eaux et les sels avant le début de l'irrigation. Le bilan de l'eau augmente considérablement par suite des infiltrations, ce qui détermine des phénomènes de salinisation.

Ces derniers se marquent :

1° Dans les solontchaks humides de la zone Tellienne, par :

— l'apparition d'efflorescences salines sur les berges des canaux d'arrosage en terre ;

— la croissance sur les francs-bords des canaux d'une végétation spécialisée (*Atriplex Halimus, Suaeda fruticosa, Sphenopus divaricatus, Salicornia fruticosa*, etc.)

2° Dans les solontchaks du Sahara Ouest :

a) Dans la vallée de la Saoura, où le régime deltaïque a disparu depuis longtemps par :

— l'apparition sur les francs-bords d'une végétation halophile grasse (*Suaeda fruticosa*) inconnue dans la région.

— la formation d'efflorescences salines sur les berges.

b) Dans la région d'Adrar par :

— l'apparition sur les francs-bords de plantes halophiles demi-grasses (Salsolacées désertiques) ;

— la formation de croûtes cristallines sur les berges.

Les taches salées saisonnières sont le phénomène le plus fréquent.

Dans les solontchaks humides de la zone Tellienne, elles amènent un ralentissement du développement de la végétation, et dans les cas extrêmes, l'apparition éphémère d'une végétation spécialisée (*Suaeda fruticosa, Atriplex hastata*, etc.).

Dans les solontchaks du Sahara Occidental, les tâches apparaissent plus rapidement (2 ou 3 mois après le commencement de la campagne d'irrigation).

Elles provoquent :

— le ralentissement de la végétation ;

— l'apparition d'une végétation spécialisée, qui se développe seulement dans la région d'Adrar.

Enfin, dans les solontchaks « inertes » de la région d'Adrar, on note l'apparition d'efflorescences salines et même de croûtes cristallines.

Tous ces phénomènes temporaires de salinisation peuvent être aisément combattus par le drainage et le colmatage des canaux, par le drainage, le nivellement et la culture de plantes résistantes au sel.

INTRODUCTION

En zone aride et désertique, les deux phénomènes temporaires de salinisation les plus fréquents sont :

— les effets de bordure des canaux d'arrosage en terre,

— les taches salées saisonnières.

Ils apparaissent généralement moins de cinq années après le début de la pratique des irrigations et, normalement, les travaux de lutte contre le salant devraient immédiatement commencer.

Mais, comme ces phénomènes sont peu importants et sans gravité apparente, ils sont souvent négligés et, dans les solontchaks humide du Tell, ils peuvent même passer inaperçus. Ce qui est très grave : la fertilité des terrains contaminés risque, en effet, de disparaître dans de très brefs délais.

Il importe donc de bien les connaître afin de les repérer rapidement et de prendre toutes les mesures nécessaires à leur limitation et, si possible, à leur réduction définitive.

I. — LES EFFETS DE BORDURE DES CANAUX D'ARROSAGE EN TERRE

Dans les aires d'irrigation nouvellement aménagées en Algérie comme au Sahara, les premières manifestations du salant se produisent toujours le long des canaux d'arrosage en terre.

Elles sont dues à une montée du niveau de la nappe phréatique saumâtre, qui est provoquée par la rupture de l'équilibre naturel existant dans les sols entre les eaux et les sels avant le début de l'irrigation.

En effet, dans les terrains voisins des canaux d'arrosage, qui sont presque constamment en charge, le bilan d'eau augmente considérablement par suite des infiltrations, ce qui détermine des phénomènes de salinisation dont l'ampleur varie avec la perméabilité des sols.

En Algérie les effets des canaux principaux et souvent des canaux secondaires sont remarquables dans les périmètres irrigables des plaines sublittorales d'Oranie (Sig, Habra, Mina et Bas-Chéliff). Malgré l'imperméabilité relative des terrains, ils peuvent être ressentis sur 50 à 100 mètres de part et d'autre de leur axe.

Dans ces régions, les aires d'irrigation sont installés dans des plaines alluviales, basses, à drainage insuffisant.

Les sols, constitués principalement par des solontchaks sodo-calciques ou calciques, sont caractérisés essentiellement par un certain degré de minéralisation naturelle qui va en s'accentuant vers l'aval à la périphérie des cônes de déjection.

Dans les parties centrales ou supérieures, au contraire, des *phénomènes de dessalinisation,* très lents et surtout appréciables après des hivers pluvieux, sont régulièrement observés.

Avant l'aménagement des périmètres irrigués, au début de l'installation française, la plaine de la Mina et surtout celle du Sig et de l'Habra avaient conservé un régime deltique : elles étaient soumises à de fortes crues qui déposaient d'importants apports alluvionnaires (1).

Malgré ces conditions particulières, les eaux phréatiques, peu profondes, sont

(1) Malgré les travaux réalisés depuis l'aménagement des périmètres irrigables du Sig (1846) et de l'Habra (1870), la plaine a subi la crue de 1927 qui a déterminé :
— son régime hydrologique actuel.
— la nature des sols agricoles.

toujours saumâtres, et, leur minéralisation ayant constamment tendance à s'aggraver, les sols appartiennent tous au type solontchak.

Les accumulations salines dans les terrains au voisinage des canaux d'arrosage en terre des zones anciennement irriguées sont traduites par :

1° l'apparition d'*efflorescences salines* sur les berges des canaux.

Dès 1851, soit moins de 5 ans après le début de l'irrigation, l'Ingénieur VILLE signalait leur présence dans les jardins de *Saint Denis du Sig*.

2° l'établissement sur les francs-bords des canaux (6 à 15 m selon les périmètres et l'importance des ouvrages) d'une *végétation spécialisée*, qui empiète sur les jachères et les terrains restés au repos pendant deux ou trois années consécutives.

Les *halophytes*, qui bénéficient alors d'apports d'eaux relativement douces (1), se développent vigoureusement car elles subissent à un degré moindre l'action dépressive d'une salure due principalement aux chlorures.

On rencontre les espèces suivantes :

Phelipaea lutea- DESF. L'orobanchacée croit sur les racines d'*Atriplex Halimus*. L et affectionne les curures des canaux. Elle pullule au printemps, donnant une physionomie très particulière aux peuplements de Salsolacées, dont elle rompt la monotonie.

Suaeda fruticosa (L), FORSK. qui peuple tous les francs-bords des canaux dans les périmètres irrigables d'Oranie orientale.

Elle est accompagnée par :

— *Sphenopus divaricatus* (GOUAN) ROHB, petite graminée qui constitue des colonies très denses localisées entre les buissons de soudes.

— *Cinomorium coccineum* L, balanophoracée très caractéristique, qui parasite les racines des soudes.

Suaeda fruticosa devient rare et même disparait totalement pour faire place :

— au groupement à *Atriplex Halimus* L, en amont,

— aux tapis de *Salicornia fruticosa* L, en aval, dans les zones périphériques, basses, des aires d'irrigation.

Les berges des canaux sont alors occupées par *Inula crithmoïdes* L et *Limonium delicatulum* (de GIR.) O. K., qui concurrencent ou même éliminent complètement *Atriplex Halimus* L.

En outre, *Salicornia fruticosa* apparait, parfois, en amont, dans les dépressions humides et salées seulement.

Très rarement et uniquement en limites inférieures des périmètres irrigables du Sig et de l'Habra, quelques buissons d'*Arthrocnemum glaucum* (DEL.) UNG et STERN, se manifestent à l'intérieur du groupement à *Salicornia* des francs-bords.

En raison de l'humidité constante entretenue dans le sol par les infiltrations, qui diluent en même temps les solutions salines, tous les halophytes ont une taille très supérieure à celle observée dans les prairies à soudes.

Dans le Sahara septentrional et central où la perméabilité des solontchaks est plus grande en raison des apports de sable d'origine éolienne et malgré l'utilisation d'eaux

(1) Les eaux d'irrigation proviennent de barrages réservoirs et renferment :

Eaux de l'Oued Cheliff...........	1	g en ClNa par litre
Eaux de l'Oued Mina	0,60 à 1	g en ClNa par litre
Eaux de l'Oued Habra...........	0,40 à 0,70	g en ClNa par litre
Eaux de l'Oued Mekena	1,25 à 2,50	g en ClNa par litre

fortement minéralisées [1], les effets de bordures des canaux d'arrosage sont beaucoup moins importants.

Dans le Centre d'Etudes d'Irrigation d'Igli, près du confluent du Guir et de la Zousfana, le régime deltaïque a disparu depuis longtemps. Les sols, qui appartiennent au type solontchak, et les eaux souterraines, toujours profondes, manifestent une tendance générale vers la salinisation.

Cette dernière se traduit par l'installation de la végétation du désert à salsolacées, caractérisée principalement dans cette région par les espèces suivantes :

Salsola vermiculata L, *var villosa* (DEL) MOQ

Salsola foetida DEL, *var eu-foetida* MAIRE

Suaeda Monodiana MAIRE

Tamarix pauciovulata J. GAY

En raison de la faiblesse de la pluviométrie (moins de 70 mm par an), les espèces annuelles sont très rares. Elles apparaissent en abondance après les pluies et leur cycle évolutif est extrêmement court.

L'accumulation des sels a eu lieu autrefois lorsque les oueds avaient un régime plus régulier qu'aujourd'hui.

Actuellement, la progression du salant est lente et souvent masquée par les apports de sable éolien, qui améliorent l'horizon superficiel du sol sur lequel évoluent les annuelles.

Sous l'influence des irrigations pratiquées sans drainage, les manifestations du salant, favorisées par un climat sec et chaud, sont devenues intenses.

Toutefois, en raison de la perméabilité des terrains et malgré l'utilisation d'eaux chargées (3 à 6 gr de chlorures en ClNa par litre), les effets de bordure des canaux d'arrosage en terre ne dépassent jamais 10 mètres de part et d'autre de leur axe.

En trois années, ils ont été suffisants pour permettre aux *halophiles grasses*, jusqu'alors inconnues dans la région, de s'implanter :

Suaeda fruticosa L (FORSK) var *longifolia* (KOCH) FENZL.

Spergularia salina J et C. PRESL.

Quelques compagnes, particulièrement significatives, se sont aussi installées :

Frankenia pulverulenta L

Sphenopus divaricatus (GOUAN) RCHL.

Ormenis praecox (LINK) BRIQ.

Cressa cretica L.

Les peuplements ne sont jamais très denses. Mais la taille des sujets est considérable ; elle dépasse toujours celle atteinte dans les solontchaks humides du Tell.

Enfin, des *efflorescences salines* apparaissent çà et là sur les berges des canaux à partir de juin. Toutefois, leur existence est éphémère car elles ne tardent pas à être recouvertes par les apports éoliens.

Dans le centre d'Etudes d'Irrigation d'Adrar, sur un solontchak inerte, à nappe phréatique très profonde, les effets de bordure des canaux d'arrosage en terre, trans-

[1] Les eaux d'irrigation renferment toujours plus de 1 g de chlorures en ClNa par litre :

Oued R'hir	7 g par litre
Nappe albienne	1,5 à 2,5 g par litre
Nappe de la Saoura	3 à 6 g par litre
Foggara du Touat	1 à 2 g par litre

portant des eaux chargées (3 gr de chlorures en ClNa par litre) sont encore plus faibles : Ils ne dépassent pas 6 mètres de part et d'autre de leur axe.

La *végétation spécialisée* s'est installée après trois campagnes d'irrigation. Elle est constituée par les *halophiles demi-grasses* du désert à Salsolacées, qui ont remplacé le peuplement de *Zygophyllum album* L et *Z. geslini* Coss.

Ce sont :

Salsola vermiculata L var *villosa* (DEL) MOQ
Salsola foetida DEL var *eu-foetida* MAIRE



FIG. 1. — *Centre d'Études d'Irrigation d'Adrar. Croûte saline en bordure d'un canal d'irrigation en terre (au premier plan). Au fond, la culture d'Orge. La graminée est naine.*

A côté de ces deux salsolacées, qui poussent vigoureusement, on trouve :

Frankenia pulverulenta L
Suaeda fruticosa (L) FORSK. var *longifolia* (KOCH) FENZL
Spergularia salina J et C. PRESL.
Sphenopus divaricatus (GOUAN) ROHL.

Comme à Igli, les peuplements sont clairsemés. Mais les sujets sont toujours de grande taille.

Enfin, les berges des canaux sont toujours absolument stériles. En raison de la température élevée et de la forte insolation, les dépôts de sels y sont très importants. Ils parviennent à former de véritables *croûtes cristallines*, qui interdisent l'installation de toute végétation, même celle spécialisée.

II. — LES TACHES SALÉES SAISONNIÈRES

Après les effets de bordure des canaux d'arrosage, les manifestations temporaires du salant qui sont ensuite les plus fréquentes dans les solontchaks livrés à la culture sont les *taches salées saisonnières*, qui sont souvent à tort négligées.

Dans les solontchaks humides de la région tellienne, elles apparaissent à partir du mois de février ou de mars, principalement dans les emblavures (Orge) qui sont suffisamment tolérantes aux sels pour s'avancer jusqu'à la périphérie des cônes de déjection sur lesquels sont aménagés les périmètres irrigables.

Les taches salées saisonnières sont d'autant plus nombreuses que le climat est plus sec et plus chaud. Ainsi elles ont connu une extension considérable pendant la campagne 1944-45 où la sécheresse a duré plus de 5 mois.

Elles sont généralement localisées dans les stations imparfaitement arrosées en raison d'un nivellement défectueux et où, avant leur apparition, les cultures éprouvent des difficultés pour évoluer normalement.

Les taches salées saisonnières évoluent de la manière suivante :

1° Ralentissement du développement de la culture, qui lève toujours dans des conditions satisfaisantes.

2° Chlorose généralisée, suivie du desséchement de l'extrémité des feuilles.

3° Arrêt de la croissance : nanisation. L'Orge ne talle presque pas.

4° Fructification hâtive et peu abondante :

— L'épiaison de l'*Orge* se fait lorsqu'elle mesure une quinzaine de cm de hauteur. Les épis sont courts et peu fournis. Les grains sont maigres et ratatinés. Ils peuvent même faire défaut.

— *Le Cotonnier* fructifie à une vingtaine de cm de hauteur. Il porte trois ou quatre capsules seulement.

— *Le Maïs*, qui reste petit, émet des fleurs mâles seulement.

A l'intérieur des taches salées saisonnières, la *salure du sol* est légèrement plus élevée que dans le reste du terrain : 1 à 2 gr de chlorures par kg de terre sèche.

Cette dose ne suffit pas pour expliquer les accidents observés dans les cultures. Ceux-ci sont dus au fait que la concentration saline varie très peu alors que, dans le terrain avoisinant, elle est extrêmement variable tout en demeurant constamment inférieure.

Cette haute teneur permanente assure une toxicité continue, qui est mal supportée par les cultures.

Lorsque la différence de salinité est plus grande (3 à 4 gr de chlorures en plus à l'intérieur de la tache), les cultures peuvent disparaître totalement. Seuls, quelques plants végètent péniblement.

Dès le mois de mars ou d'avril, les halophytes apparaissent. Ce sont :

Suaeda fruticosa (L) Forsk
Atriplex hastata L
Atriplex Halimus L
Spergularia salina J et C Presl
Suaeda maritima (L) Dumort
Cressa cretica L

Il s'agit toujours de germinations qui n'ont pas le temps de devenir adultes avant la fin de l'évolution des cultures. Elles meurent généralement dès que cessent les arrosages, qui créaient des conditions favorables à leur développement en provoquant un exhaussement temporaire et localisé de la nappe phréatique salée.

Au Sahara, dans le Centre d'Etudes d'Irrigation d'Igli, les taches salées saisonnières se manifestent à partir de fin décembre soit moins de trois mois après le commencement de la campagne d'irrigation. Les cultures ont alors reçu :

4 500 m³/ha pour les céréales

6 000 m³/ha pour les cultures maraîchères.

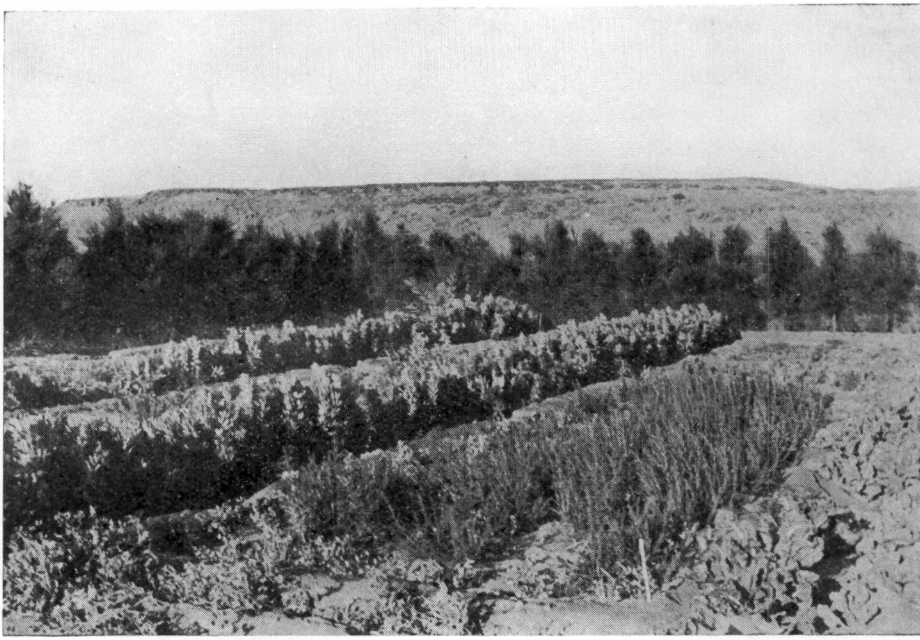


FIG. 2. — *Centre d'Études d'Irrigation d'Igli. Tache salée saisonnière dans des cultures maraîchères.* Suaeda fruticosa *var.* longifolia *forme un peuplement très dense au milieu de la planche billonnée (irrigation par infiltration) qui fut ensemencée en fèves. Seuls, les plants, poussés en bordure de la séghia principale d'arrosage se sont développés ; ils ont bénéficié du milieu relativement assaini que constitue le bourrelet de la séghia.*

L'évolution des taches est beaucoup plus rapide que dans la région tellienne. De même, l'intensité du phénomène est plus grande.

En effet, la toxicité des sels augmente sous le climat saharien, sec et chaud, où les plantes ont des besoins accrus en eau.

Aussitôt après la levée, qui peut-être mauvaise, le développement de la culture ralentit. Souvent, il est totalement arrêté et les plantes meurent desséchées malgré les arrosages. On dit qu'elles sont « grillées » par le sel.

Dans le même temps, les halophytes, qui bénéficient de solutions salines légèrement diluées, lèvent et poussent avec une grande vigueur.

En un ou deux mois, elles prennent un développement considérable et parviennent à occuper intégralement la partie centrale des taches : elles étouffent complètement la culture dont la vitalité est diminuée.

La *composition floristique* du groupement végétal spécialisé, qui peuple les taches salées saisonnières disparaissant en mars avec l'arrêt de l'arrosage des céréales, est simple :

Suaeda fruticosa (L) FORSK var *longifolia* (KOCH) FENZL.
Frankenia pulverulenta L
Sphenopus divaricatus (GOUAN) ROCHL.
Melilotus sulcata DERF.
Atriplex dimorphostegia KAR et KIR.

Dans les taches localisées dans les cultures maraîchères ou les arrosages se poursuivent jusqu'en mai, il apparaît en plus :

Spergularia salina J et C PRESL.
Ormenis praecox LLink) BRIQ
Melilotus indica (L) ALL
Cressa cretica L

Dans les deux cas, les sujets sont de taille moyenne. La température élevée leur permet d'évoluer rapidement et de fructifier.

Dans le Centre d'Etudes d'Irrigation d'Adrar, les taches salées saisonnières apparaissent souvent dès le début de décembre, soit deux mois environ après le commencement de la campagne d'irrigations. Les cultures ont alors reçu :

6 500 à 8 000 m^3/ha pour les céréales
10 000 m^3/ha pour les cultures maraîchères.

Comme à Igli ,la culture disparaît presque complètement dès la levée. Les halophytes, qui croissent rapidement, contribuent pour une part importante à sa destruction. Ce sont :

Suaeda fruticosa (L) FORSK var *longifolia* (KOCH) FENZL
Frankenia pulverulenta L

et plus rarement :

Spergularia salina J et C PRESL.

Cependant, cette végétation spécialisée, relativement clairsemée mais de grande taille est souvent détruite par le salant dans la partie centrale des taches lors des premières chaleurs en février-mars.

Le terrain, dépourvu de toute végétation, prend alors l'aspect chotteux, caractéristique des solontchaks pendant l'été.

Il peut se couvrir d'*efflorescences salines* en avril-mai et, ça et là, dans les dépressions, ils se forment de véritables *croûtes cristallines*.

La salure, trop élevée, interdit alors toute végétation.

La situation ne redevient normale qu'après l'arrêt total des irrigations.

CONCLUSION

Ces accidents (effets de bordure des canaux d'arrosage en terre, taches salées saisonnières) sont des phénomènes de salinisation secondaire sans gravité, qui peuvent être facilement combattus.

Le damage et le colmatage permettent de lutter contre les méfaits dus aux infiltrations des canaux.

Dans les Centres d'Etudes d'Irrigation du Sahara occidental, d'excellents résultats ont été obtenus en revêtant les berges avec le « Tinn », argile rougeâtre commune dans la région.

Dans le Tell, les canaux d'arrosage en terre sont peu à peu remplacés par des éléments mobiles en béton précontraint. Ce qui élimine totalement les infiltrations qui pourraient favoriser l'augmentation des réserves d'eaux phréatiques et déterminer leur remontée progressive.

Le drainage, en provoquant un abaissement de la nappe phréatique, donne des résultats intéressants lorsqu'il est combiné avec la pratique soit de cultures tolérantes aux sels et grosses consommatrices d'eau (Riz, Luzerne, Kenaf), soit d'arrosages de lessivage, effectués en fin de période sèche après exécution d'un labour superficiel.

Les *taches salées saisonnières* passent souvent inaperçues dans la région tellienne en raison de leur caractère temporaire et de leur faible toxicité. Ce qui est très grave ; faute d'être combattue, la progression du salant risque de persister et de devenir une salinisation stabilisée, qui est beaucoup plus difficile à éliminer.

Généralement, les exploitants s'inquiètent lorsqu'ils constatent l'installation des halophytes dans les cultures.

S'ils disparaissent avant l'été, les mesures d'assainissement ne sont pas toujours exécutées car elles sont onéreuses. Il s'ensuit que le danger demeure alors à l'état latent. Il peut par la suite réapparaître brusquement et, en s'établissant définitivement, anéantir plusieurs récoltes.

Les taches salées saisonnières sont combattues efficacement en Algérie comme au Sahara par :

— des nivellements très soignés,

— des travaux de drainage. L'espacement entre les drains est variable selon la perméabilité des terrains. La profondeur doit être la plus grande possible. De bons résultats ont été obtenus avec les profondeurs de :

1,50 m pour les cultures superficielles.

2,50 à 3,50 m pour les plantations arbustives.

— des irrigations de lessivage effectuées en fin de période sèche lorsque la concentration saline des horizons superficiels est optimale.

— des techniques culturales particulières.

— la pratique de cultures tolérantes au salant et avides d'eau : Luzerne, Cotonnier, Kenaf, Mélilot.

Reçu pour publication en octobre 1961.

SUMMARY

TEMPORARY PHENOMENA OF SALINIZATION IN ALGERIAN AND SAHARIAN IRRIGATED SOILS

In a recently parcelled-out irrigation area, the first salting phenomena always appear along the soil irrigation canals.

They are due to a rise in the phreatic water-table caused by the upsetting of the natural balance existing in the soils between the water and the salts before the beginning of irrigation. The water balance increases considerably owing to infiltrations, and this creates salinization phenomena.

The latter occur :

1. — In the humid solottchaks of the Tell zone, through :

The appearance of salt efflorescences on the banks ;

The growth of specializes vegetation on the carvels (*Atriplex Halimus, Suaeda fruticosa, Sphenopus divaricatus, Salicornia fruticosa*, etc.).

2. — In the solontchaks of the Western Sahara :

a) In the Saoura valley, where the delta system has long disappeared, through :

The appearance on the carvels of thick-leaved halophilous plants (*Suaeda fruticosa*) unknown in the region ;

The formation of salt efflorescences on the banks.

b) In the Adrar region, through :

The appearance on the carvels of halophilous plants with semi-thick leaves (salsolaceous desert species) ;

The formation of crystalline crusts on the banks.

The *seasonal salt patches* are the most frequent phenomena.

In the humid solontchaks of the Tell zone, they cause the retrogression of the vegetation and, in extreme cases, the ephemeral appearance of a specialized vegetation (*Suaeda fruticosa, Atriplex hastata*, erc.).

In the solontchaks of the Western Sahara, the patches appear at an early stage : 2 or 3 months after the beginning of the irrigation campaign.

They provoke :

— the disappearance of the vegetation ;

— the appearance of a specialized vegetation, which develops solely in the Adrar region.

Lastly, in the inert solontchaks of the Adrar region, the appearance of efflorescences and even of crystalline crusts.

All these temporary phenomena of salinization can be easily checked by lining and surfacing of the canals, drainage, levelling and the cultivation of hydrophilous vegetation.

ZUSAMMENFASSUNG

DIE ZEITWEILIGEN SALINIERUNGSERSCHEINUNGEN DER BEWÄSSERTEN BÖDEN ALGERIENS UND DER SAHARA

In den in Algerien sowie in der Sahara neu angelegten Bewässerungsarealen ereignen sich die ersten Salinierungserscheinungen in den am Rande der Bewässerungskanäle liegenden Böden.

Sie sind die Folge einer Erhöhung des brackischen Grundwasserspiegels, durch Störung des natürlichen Gleichgewichts hervorgerufen, welches im Boden zwischen dem Wasser und den Salzen vor Beginn der Bewässerung herrscht. Die Wasserbilanz nimmt infolge der Einsickerungen gewaltig zu, was dann zu Salinisierungserscheinungen führt.

Letztere machen sich bemerkbar :

1° In den feuchten Solontschaks der Tellzone durch ;

— salzigen Anflug der Kanalufer ;

— besondere Vegetation am freien Ufer der Kanäle ;

(*Atriplex Halimus, Suaeda fruticosa. Sphenopus divaricatus, Salicornia fruticosa* usw).

2° In den Solontschaks der westlichen Sahara :

a) Im Tale der Saoura, wo das Dezltaregim schon lange verschwunden irt, durch :

Erscheinen aud den freien Ufern einer in der Gegend unbakannten fetten halophilen Vegetation (*Suaeda fruticosa*).

b) In der Gegend von Adrar durch :

— Erscheinen auf den freien Ufern halophiler, halbfetter Pflanzen (Salsolaceae der Wüste) ;

— Bildung kirstallischer Krusten auf den Uferne. Die Flecken sind meist nur vorübergehend.

In den feuchten Solontschaks der Tellzone bewirken sie eine Verzögerung des Wachstums, und in extremen Fällen die vorübergehende Erscheinung einer speziellen Vegetation (*Suaeda fructicosa, Atriplex hastata* usf).

In den Solontschaks der Westlichen Sahara erscheinen die Flecken schneller (etxa 2 *bis* 3 Monate nach Beginn der Bewässerung).

Sie ergeugen :

— eine Verzögerung des Wachtums.

— das Erscheinen einer speziolisierten Vegetation die sich nur in der Gegend von Adrar entwicjkelt. In den « trägen » Solont schaks der Gegend um Adrar bemerkt man Salzanflüge und selbst kristallische Verkrustung.

Alle diese zeitweiligen Erscheinungen können leicht bekämpft werden, durch Feststampfen, Eindämmen, Drainage, Einebnen und Anbau salzresistenter Pflanzen.

Временные явления вызванные засолением орошаемых почв Алжира и Сахары.

СИМОННО — Алжир.

Первые признаки засоления на пространствах недавно подвергнутых орошению в Алжире и Сахаре, появляются всегда по краям ирригационных каналов.

Они вызываются под'емом уровня солоноватых грунтовых вод, который получается в свою очередь благодаря разрыву природного равновесия существовавшего в почвах до начала орошения в соотношении между водой и солью.

Просачивание вызывает сильное увеличение водного баланса, что и приводит к явлениям засоления.

Явления эти характеризуются :

1. В сырых солончаках Теллийской зоны :

— Появлением налета соли на каймах поливных каналов.

— Произрастанием на бортах каналов специфической растительности (*Atriplex halimus, Suaeda fruticosa, Sphenopus divaricatus, Salicornia fruticosa*... и.т.д.).

2. В солончаках Западной Сахары :

а. В долине уэда Сауры, где дельтовый режим исчез уже давно :

— Появлением на бортах сочной солончаковой растительности (*Suaeda fruticosa*), неизвестной в этом районе.

Образованием налетов соли на берегах.

в. В районе Адрара :

— Появлением на бортах полу-сочных солончаковых растений (Пустынные растения семейства Сальсолаковых).

Образованием кристаллических корок по берегам.

Сезонное появление соленых пятен — явление наиболее частое.

В сырых солончаках района Телля они вызывают замедление развития растительности и иногда, эфемерное появление растительности специфической (*Suaeda fruticosa*, *Atriplex hastata*... и.т.д.).

З солончаках Западной Сахары пятна проступают быстрее (2 или 3 месяца после начала оросительного периода).

Они вызывают :

— Замедление развития растительности.

— Появление специфических растений.

И, наконец, в « инертных » солончаках района Адрара отмечается появление налетов соли и даже кристаллических корок.

Против всех этих временных явлений засоления можно легко бороться при помощи утрамбовок, или намывов земли в каналы, а так-же при помощи дренажа, нивелировки и возделывания мало-чуствительных к соли растеий.

Ann. agron., 1961, **12** (6), 573-597.

635. 9 : 631. 8

ÉTUDE SUR LA FERTILISATION DE L'ŒILLET

Denise BLANC
avec la collaboration technique de Simone MARS et Christiane OTTO

Station d'Agronomie et de Physiologie végétale,
Centre de Recherches agronomiques de Provence, Antibes.

SOMMAIRE

L'étude de la fertilisation de l'Œillet en culture intensive nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

1° Des apports importants d'azote minéral, pouvant atteindre 400 grammes par mètre carré et par an, sont indispensables en cours de culture pour assurer une production de fleurs continue et abondante, tout au long de l'année.

2° La fertilisation azotée doit être complétée par une fertilisation potassique de l'ordre de 100 grammes de potassium par mètre carré et par an de façon à maintenir un équilibre azote-potasse, convenable dans le milieu et dans la plante.

3° Les fortes fumures préconisées impliquent l'adoption de techniques d'engraissement fractionné (tous les 10 jours environ) avec des sels entièrement assimilables et apportant les seuls éléments N et K, d'une part pour éviter l'augmentation passagère de la concentration de la solution de sol au moment des apports, d'autre part pour éliminer les risques d'une accumulation excessive et constante des ions non absorbés (SO_4-Cl-Na) dans le milieu de culture.

4° Il est difficile de concilier quantité et qualité : une augmentation du nombre de fleurs produites déterminant très généralement une diminution de la vigueur de la tige florale et du poids de la fleur.

5° L'analyse minérale des boutures prélevées sur la tige florale a fait apparaître une sensibilité suffisante des boutures aux variations des éléments N et K dans le sol pour que des études plus complètes soient entreprises dans ce domaine en vue de contrôler la nutrition en cours de culture.

Dans une mise au point récente sur la situation des cultures florales dans les Alpes-Maritimes, ARNAUD (1958) classe en deux groupes les trois variétés d'Œillets cultivés à l'heure actuelle, dans ce département. Il distingue :

— l'Œillet courant et le gros Œillet, tous deux Œillets niçois qui ont comme caractères communs leur rusticité et leur calice fendu, ce dernier les faisant qualifier de « crevards ».

— L'Œillet dit américain qui se différencie des deux types précédents par un calice entier et par des exigences culturales bien définies.

Nous avons déjà été amenés à signaler dans quelle mesure l'introduction en France de l'Œillet américain a imposé l'adoption de techniques culturales mieux adaptées aux exigences de ces nouvelles variétés : exigences de milieu, imposées par leur moins grande rusticité, exigences de fumure, déterminées par une plus grande productivité et une exportation plus importante d'éléments minéraux (BLANC, 1961).

L'étude de la fertilisation de l'Œillet américain est relativement récente et a été poursuivie essentiellement dans son pays d'origine. Les renseignements que l'on en retire pour nos conditions de culture et de milieu, sont assez limités car les principaux essais ont été effectués dans les régions de grosse production (Colorado, Californie, Massachusetts), régions dans lesquelles les conditions de milieu, et plus précisément les facteurs climatiques qui interviennent en premier plan, dans le développement du végétal et sur son équilibre physiologique, sont très différentes de celles qui règnent dans le midi de la France. Ceci rend difficilement transposables dans notre région, les données de l'expérience américaine.

PUCCINI (1954-1956) a étudié la nutrition de l'Œillet niçois et italo-américain sur la Riviera Italienne où les facteurs climatiques sont plus semblables aux nôtres. Mais cette étude, qui relate principalement les exportations en éléments minéraux aux différents stades du développement de la plante, a été conduite selon les techniques culturales de plein air, très différentes de celles couramment pratiquées dans la culture sous serre fixe qui tend à se généraliser dans notre région.

La carence d'expérimentation conduite sous nos conditions climatiques avec nos techniques culturales, jointe à l'engouement croissant pour ces nouvelles variétés, nous a incité à entreprendre cette première étude sur la fertilisation de l'Œillet américain. Une revue de bibliographie rapide nous permettra de dégager les caractères principaux de la nutrition de l'Œillet américain et de justifier le choix des facteurs que nous avons retenus comme étant ceux à étudier en premier lieu.

I. — INTRODUCTION

L'Œillet est une plante « facile » qui s'accommode très bien des sols les plus divers et qui répond également bien aux solutions nutritives les plus variées : témoin les divers équilibres des solutions nutritives conseillées par WARD (1903) dans son traité sur la culture de l'Œillet américain, pour lui avoir donné des résultats également satisfaisants, et que nous avons réunis dans le tableau suivant :

Formule	En grammes par litre				
	N	P_2O_5	K_2O	Rythme des apports	Sels utilisés
A	0,29	1,2	0,58	1 fois tous les 15 jours	Superphosphate Nitrate de soude Sulfate de potasse
B	0,13	0,08	0,10	2 fois par semaine	Nitrate de soude Nitrate de potasse Phosphate d'ammoniaque
C	0,04	0,13	0,03	1 fois par semaine	Superphosphate Nitrate de potasse Phosphate d'ammoniaque Nitrate de soude

La diversité des équilibres proposés permet difficilement de se faire une idée sur les exigences particulières de cette espèce, et la recherche d'un équilibre optimum

peut sembler inutile. Ce sont sans doute les raisons pour lesquelles l'étude de la fertilisation de l'Œillet est restée inabordée jusqu'aux environs de 1936. De 1900 à cette date, l'éclatement du calice, accident de première importance pour des variétés dont le caractère sélectif est précisément la présence d'un calice solidement soudé, est resté au premier plan des préoccupations, et la bibliographie de cette période se résume en un certain nombre d'observations tendant à attribuer cet accident à des causes successivement héréditaires et climatiques, l'éventualité d'une relation entre la fertilisation et l'éclatement n'étant envisagée pour la première fois qu'en 1938 par SZENDEL. Les essais entrepris dans ce sens ont été conduits sur sable alimenté par des solutions nutritives diverses et ont permis de conclure qu'une déficience en éléments nutritifs N et P, essentiellement, augmente le pourcentage d'éclatement. Bien que ces essais ne constituent qu'une part minime de l'ensemble du travail de SZENDEL sur l'éclatement, il convient de les citer car ils ont permis à l'auteur de signaler la sensibilité de l'Œillet à une carence en potassium (SZENDEL, 1939) et ont ainsi donné le départ à un ensemble de travaux sur l'étude des carences et sur la recherche de l'équilibre minéral optimum qu'il convient de maintenir pour cette culture. Les premiers en date sont ceux de CLAPP et FOLLEY (1941) qui étudient, sur sable, l'influence sur le développement de la plante et la qualité de la fleur, de la suppression dans la solution nutritive de l'un des éléments N, P, K ou Ca. Cependant l'auteur ne donne aucune indication sur les doses moyennes à retenir. Dans le même ordre d'idée, il convient de signaler le travail de MESSING (1958), qui, au cours d'essais analogues, décrit les symptômes visuels sur feuilles, de déficience en éléments essentiels.

Des essais systématiques sur l'étude de l'influence de la fumure de l'Œillet américain sur la production ont été entrepris dans le Colorado, par BEACH et MUSSENBROCK (1948). Dans une première expérience conduite sur sol, comportant cinq doses différentes d'azote et pour chacune d'elles deux doses de potassium, ces auteurs ont obtenu des augmentations significatives de rendement avec l'accroissement de la fumure azotée, et une corrélation entre le nombre de fleurs et la longueur des tiges. Le potassium n'a eu aucune influence sur la production, et pour les doses utilisées, l'azote n'a pas manifesté d'action dépressive. Des essais analogues repris quelques années plus tard (BEACH, 1952) ne permettaient pas de confirmer les résultats obtenus antérieurement avec l'azote.

A partir de 1951, HOLLEY et ses collaborateurs, à Fort Collins (Colorado), entreprennent l'étude de la nutrition minérale de l'Œillet. Ils confirment les résultats obtenus par BEACH et ses collaborateurs en 1948, avec l'azote (HOLLEY, WAGNER, FARMER, 1951 et 1952) ; des doses d'azote de 5, 10 et 20 grammes par mètre carré et par mois sont appliquées en même temps que des quantités variables d'eau. Les apports les plus élevés en azote déterminent des augmentations significatives de production sans nuire à la qualité, qui est, elle aussi, fonction de la nutrition azotée. Les trois taux d'humidité maintenus sont sans action sur la production. Les éléments K, Ca, Na, dans leur relation avec la production et la qualité sont étudiés à leur tour (HOLLEY, 1954). Le potassium détermine une augmentation de la production, les meilleurs résultats, en qualité et quantité étant obtenus avec les doses moyennes de 200 grammes par mètre carré et par an. Le sodium n'a pas d'action, sauf en cas de déficience en potassium vis-à-vis duquel il jouerait un rôle de remplacement. Quant au calcium, il n'a aucune action ni sur la qualité ni sur la quantité.

L'étude de l'acide phosphorique ne permet pas d'observer une action favorable

sur le développement, sauf en cas de déficience extrême (HOLLEY, 1955). Des essais repris en 1960 pour comparer l'efficacité de deux formes d'engrais phosphatés, confirment que l'augmentation des apports phosphatés est sans action sur la production (PETERSON et HOLLEY, 1960).

Parallèlement à ces travaux, LUNT, SCIARONI et BOWLES (1953) en Californie, étudient également l'action de doses variables de N, P, et K. Ils confirment les résultats de HOLLEY et ses collaborateurs pour l'azote, à savoir, l'augmentation de production avec l'augmentation de la fertilisation azotée. Avec la potasse ils obtiennent des résultats variables, mais jamais très différents entre eux ; quant à l'acide phosphorique son action est nulle. Ces auteurs soulignent les risques d'augmentation de salinité du sol pour laquelle ils indiquent un maximum qu'ils conseillent de ne pas dépasser et, dans un travail ultérieur, étudient l'influence de la concentration saline sur la production (LUNT, KOHL, KOFRANEK, 1958).

De l'ensemble de ces données un certain nombre de faits semblent acquis, d'autres méritent d'être précisés. L'acide phosphorique doit être présent dans le sol en quantité suffisante, mais des apports supplémentaires s'avèrent inutiles, et quelquefois même nocifs pour la qualité de la fleur. Par contre, l'azote est l'élément prépondérant de la fumure et comme le signalaient déjà DORNER, MUNCIE et NEHRLING (1914) il devient rapidement facteur limitant. Il en résulte que l'Œillet est une plante répondant à de très forts apports d'azote, et reçoit de ce fait des fumures azotées importantes. Or, l'efficacité de la fumure potassique est vraisemblablement en relation étroite avec l'intensité de la fumure azotée. L'éventualité d'une interaction azote-potasse peut alors être à l'origine des résultats variables observés avec l'élément K. Tous les essais référés ci-dessus, et orientés sur l'étude de la fertilisation potassique de l'Œillet, ont été conduits à une seule dose moyenne d'azote. Dans une seule étude, l'action réciproque des divers facteurs de la fumure a été envisagée. C'est celle de CHAN et ses collaborateurs (1958), qui ont observé que l'action de la potasse est d'autant plus marquée que les doses d'azote apportées sont plus importantes. Cet essai a été conduit sur sable alimenté par des solutions nutritives. La transposition au sol de ces résultats est délicate et mérite une vérification.

C'est sous cet angle que nous avons abordé le problème de la fertilisation de l'Œillet. Compte tenu des résultats précédents, nous avons limité notre étude à l'influence, du point de vue quantitatif et qualitatif, des seuls éléments azote et potassium, l'acide phosphorique étant incorporé au milieu de culture avant la plantation. Par ailleurs, les conditions de culture dans un milieu fermé, soustrait de façon définitive au lessivage par les eaux de pluie, jointes à l'importance des apports nécessaires pour compenser les exportations particulièrement élevées d'une culture d'Œillet (BLANC, 1961) soulèvent un certain nombre de difficultés culturales qui ont été précisées par DROUINEAU (1961) et dont la plus fréquente est une accumulation des ions complémentaires non utilisés par la plante, déterminant une augmentation excessive de la salinité du sol. Nous avons éliminé ces ions complémentaires en utilisant dans nos essais des sels n'apportant que de l'azote et de la potasse. Cependant les risques de salinité périodiques et passagers persistent, si les apports sont trop importants à un instant donné, d'où la nécessité de pratiquer des apports fractionnés. La technique de la ferti-irrigation est la mieux adaptée à ce genre de fertilisation, et s'étend peu à peu dans la pratique horticole. Nous l'avons donc adoptée et avons comparé deux rythmes d'apports de façon à préciser dans quelle mesure un fraction-

nement plus ou moins important des fumures modifie les rendements et la qualité des fleurs récoltées.

II. — MATÉRIEL ET MÉTHODES

Dispositif cultural

L'essai a été conduit en pots de grès drainés, dans lesquels nous nous sommes efforcés de reproduire le plus fidèlement possible, le milieu de culture couramment utilisé dans le midi de la France. Ce milieu de culture constitué par un mélange de terre, tourbe et matière organique est, dans la pratique, maintenu en place dans des banquettes limitées latéralement par des plaques de ciment posées à même le sol. Ce dispositif est une solution intermédiaire et transitoire entre le système de culture en pleine terre pratiqué pour l'Œillet ordinaire, en culture traditionnelle, et le système de culture en bacs surélevés et renfermant un mélange de terre, de tourbe et de sable, utilisé à l'étranger.

Dans les pots de culture nous avons donc disposé, successivement :

— sur 6 centimètres d'épaisseur, un mélange de terre et de sable grossier. Le sable incorporé à raison de 500 g pour 3 kg de terre est destiné à faciliter le drainage qui s'effectue par un orifice percé à la partie inférieure du pot.

— Puis un horizon de 15 cm formé de 8kg d'un mélange de terre, de tourbe et de fumier. Ces trois éléments ont été mélangés dans les proportions de 795 kg de terre, 6 kg de tourbe et 37 kg de fumier, ce qui correspond, pour une épaisseur de 15 cm à des apports de tourbe et de fumier de l'ordre de 1,500 kg et 8 kg environ au mètre carré. Avant la mise en place des boutures, une fumure de base constituée par 50 g d'une résine urée-formol (Azorgan), 20 g de sulfate de potasse et 100 g de superphosphate au mètre carré, a été incorporée au mélange.

L'analyse chimique du milieu de culture ainsi constitué est reportée dans le tableau suivant :

N total p. 100	1,20	P_2O_5 (facilement assimilable) Truog p. 1000	0,18
N minéral ppm	4,9	K_2O échangeable p. 1000	0,80
pH H_2O	6,9	CaO échangeable p. 1000	5,04
pH KCl	5,8	MgO échangeable p. 1000	0,54

Le contrôle phytosanitaire a été assuré par l'incorporation au milieu de culture d'aldrine à la dose de 8,5 g par mètre carré d'un produit commercial contenant 5 p. 100 de matière active et par la désinfection du sol au Vapam, trois semaines avant la mise en place des boutures. Ce dernier produit a été apporté en arrosage avec 1 litre d'une solution à 7 pour mille de façon a apporter 150 cc de produit commercial au mètre carré. En cours de culture, des pulvérisations à base d'insecticides et de fongicides ont permis de lutter efficacement contre les maladies et parasites classiques de l'Œillet et de conduire les essais sans perturbation d'ordre parasitaire.

La variété retenue pour nos essais est la variété Ann. Les plants ont été choisis aussi homogènes que possible et parfaitement sains parmi un lot important de boutures enracinées sur perlite et présentant un système radiculaire bien développé. Toutes ces garanties ont permis l'obtention d'une végétation homogène pour chacun des traitements.

Dans le système de culture en banquettes, l'espacement généralement maintenu entre les plants est de 15 cm sur des rangées elles-mêmes espacées de 20 cm. La densité de plantation est donc de l'ordre de 33 boutures au mètre carré. La surface des pots de culture ne nous permettant pas de travailler à densité de plantation égale, nous avons été amenés à cultiver 2 plants par pot ce qui correspond à une densité de plantation supérieure, de l'ordre de 44 boutures au mètre carré.

Nous avons suivi rigoureusement les techniques culturales pratiquées en pleine terre, pour les pincements et pour l'éboutonnage. Les boutures mises en place le 11 juin 1959 ont donné les premières fleurs le 24 septembre et l'essai a été poursuivi jusqu'à la fin avril 1960.

Les pots de culture groupés par quatre sur des chariots roulants sont tournés chaque jour de 180 degrés de façon à éliminer les différences d'éclairement pouvant résulter de la position respective des pots sur un même chariot. De plus, périodiquement, un mouvement de translation de l'ensemble des chariots nous a mis à l'abri d'une éventuelle irrégularité des conditions ambiantes à l'intérieur même de la serre.

De la plantation jusqu'au 25 octobre, la culture a été conduite dans la serre grillagée ouverte, dont le toit mobile était fermé en cas de pluie. Les conditions de milieu étaient donc les conditions ambiantes de plein air.

A partir du 25 octobre, l'ensemble des chariots a été déplacé dans la serre fixe vitrée, aérée dans la journée, et maintenue, la nuit à 10°C par un chauffage d'appoint. Ce chauffage a été maintenu jusqu'au 20 mars, et les chariots sont restés dans la serre vitrée jusqu'à la fin de la culture.

Traitements.

L'essai comporte 15 traitements : 5 doses d'azote et 3 doses de potasse. Les apports mensuels ont été calculés sur la base de 0,10, 30, 50 et 75 grammes d'azote et 0, 5 et 15 grammes de potasse au mètre carré. Ils ont été fixés en tenant compte des exportations exceptionnellement élevées de l'Œillet de type américain. Nous avons été amenés à signaler par ailleurs (loc. cit. 1961), qu'à densité de plantation égale, ce dernier exporte 4 fois plus d'azote et 2 fois plus de potasse que l'Œillet de type niçois.

TABLEAU I

Tableau récapitulatif de l'ensemble des traitements

Traitements	Apports N et K tous les 10 jours				Apports chaque mois		
	Les 1er et 11 de chaque mois	Le 21 de chaque mois			Le 1er de chaque mois		
	NO_3NH_4	NO_3NH_4	NO_3K	SO_4K_2	NO_3NH_4	NO_3K	SO_4K_2
		en cc de solutions mères			en cc de solutions mères		
N_0K_0 (1)	—	—	—	—	—	—	—
$N_{10}K_0$	4,3	4,3	—	—	12,9	—	—
$N_{30}K_0$	12,9	12,9	—	—	38,7	—	—
$N_{50}K_0$	21,5	21,5	—	—	64,5	—	—
$N_{75}K_0$	32,2	32,2	—	—	96,6	—	—
N_0K_5	—	—	—	10	—	—	10
$N_{10}K_5$	4,3	2,0	5.8	—	10,6	5,8	—
$N_{30}K_5$	12,9	10,6	5,8	—	36,4	5,8	—
$N_{50}K_5$	21,5	19,1	5,8	—	62,1	5,8	—
$N_{75}K_5$	32,2	30,0	5,8	—	94,4	5,8	—
N_0K_{15}	—	—	—	30	—	—	30
$N_{10}K_{15}$	3,0	—	17,4	—	6,0	17,4	—
$N_{30}K_{15}$	12,9	6,0	17,4	—	31,8	17,4	—
$N_{50}K_{15}$	21,5	14,6	17,4	—	57,6	17,4	—
$N_{75}K_{15}$	32,2	25,4	17,4	—	89,8	17,4	—

Solutions mères.
Solution de NO_3NH_4 à 35 g d'azote par litre.
Solution de NO_3K à 13,86 g d'azote par litre
et 38,61 g de potassium par litre
Solution de SO_4K_2 à 22,4 g de potassium par litre.

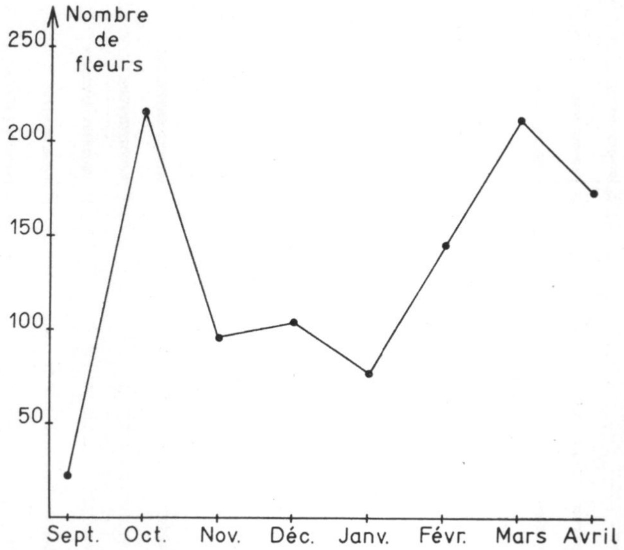
(1) Les nombres en indice, représentent les apports respectifs de N et de K en grammes par mètre carré et par mois pour chacun des traitements.

L'azote a été apporté sous forme de nitrate d'ammoniaque dans les traitements sans apport potassique. Dans les traitements avec apports de potasse, la totalité de celle-ci a été apportée sous forme de nitrate de potasse et le complément d'azote sous forme de nitrate d'ammoniaque. Ces sels ont été choisis de façon à n'apporter aucun autre élément de variation que les éléments étudiés à l'exception des traitements sans azote où la potasse a été apportée sous forme de sulfate.

Chaque traitement comporte 6 répétitions. Nous avons en outre comparé deux rythmes d'apports. Dans une première série la fumure azotée a été incorporée sous forme d'apports fractionnés les 1er, 11 et 21 de chaque mois. La deuxième série a reçu la totalité des apports N, le 1er de chaque mois. Aux dates indiquées les pots fertilisés ont reçu la quantité nécessaire de sels en solution dans 500 cc d'eau déminéralisée, et les pots témoins, la même quantité d'eau déminéralisée. Dans tous les cas, la fumure potassique a été apportée en une seule fois le 1er de chaque mois.

Le tableau 1 résume l'ensemble des traitements.

En outre, un arrosage supplémentaire de 500 cc a été appliqué à la totalité des pots, chaque semaine, pendant les mois d'été. Ces arrosages ont été réduits de moitié pendant l'hiver. Le liquide drainé à la partie inférieure des pots est repassé en surface jusqu'à épuisement de façon à éviter les pertes par lessivage et à mettre réellement à la disposition de la plante la totalité des éléments prévus dans chacun des traitements.



GRAPHIQUE 1. — Production mensuelle pour l'ensemble des traitements.

Cueillette — Déterminations effectuées.

La cueillette a été effectuée chaque matin à partir du 24 septembre et jusqu'à fin avril.

Pour chacun des pots de culture nous avons noté successivement :

— le nombre de fleurs récoltées ;
— la longueur de la tige florale ;
— les poids respectifs du bouton, de la tige, des feuilles et des pousses axillaires ;
— l'éclatement éventuel du calice ;
— et, en fin de culture, le poids du pied coupé au ras du sol.

Ces différentes observations nous ont permis d'apprécier, en fonction du traitement, la production totale de matière végétale, parallèlement à la production et à la qualité des fleurs récoltées.

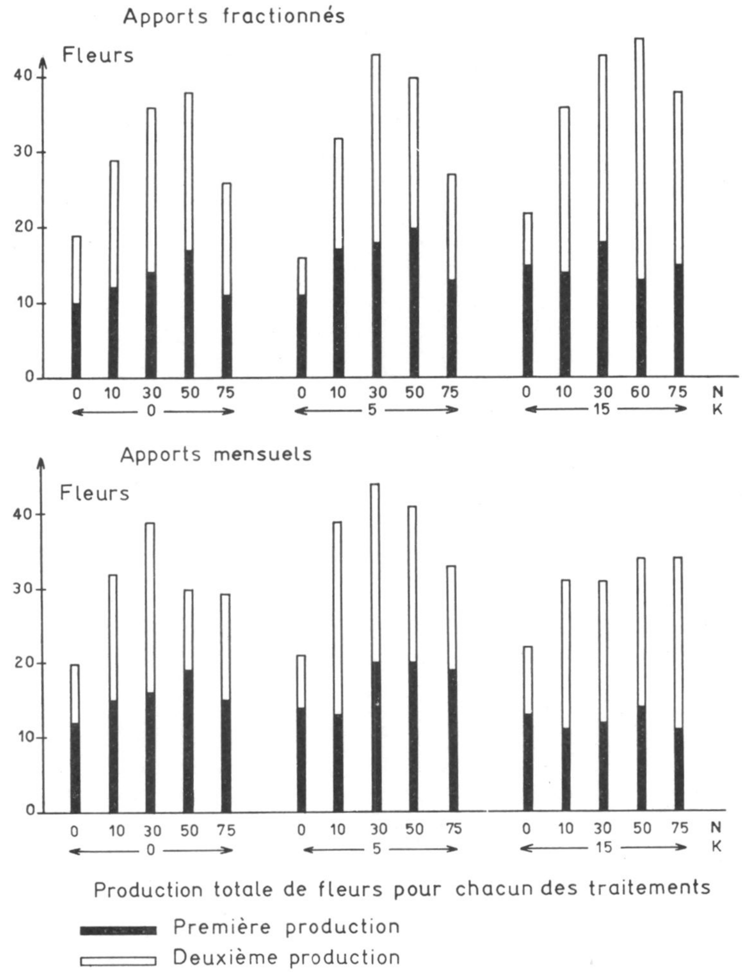
En outre, les pousses axillaires développées sur les tiges florales, en cours de culture, ont été conservées en vue d'établir l'équilibre minéral de ces jeunes rameaux en fonction des traitements.

La détermination des teneurs en azote minéral (constitué essentiellement par de l'azote nitrique) et en azote organique total ainsi que celle des teneurs en P, K, Ca et Mg nous permettra en plus de considérations d'ordre purement physiologique, de préciser dans quelle mesure l'analyse des boutures peut servir de contrôle à la nutrition, en cours de culture.

III. — RÉSULTATS CULTURAUX

A. — *Influence de la fertilisation sur la production*

Pendant les sept mois de cueillette, le nombre total de fleurs ramassées a été de 1054, ce qui correspond à une production annuelle moyenne, pour l'ensemble des



GRAPHIQUE 2. — Production totale de fleurs pour chacun des traitements.

traitements de l'ordre de 10 fleurs par pied. Cette moyenne est une récolte normale dans une culture bien conduite. Nous avons représenté sur le graphique 1 la courbe de production mensuelle pour l'ensemble des traitements. Cette courbe présente deux maxima : le premier en octobre, le second en mars-avril, avec une floraison continue, mais ralentie, pendant les mois d'hiver, de novembre à janvier inclusivement.

En première approximation, on peut distinguer deux périodes de production

que nous avons arbitrairement séparées au mois de janvier, mois de production minimum.

L'examen du graphique 2 sur lequel nous avons représenté distinctement chacune des productions au cours des périodes ainsi déterminées, met en évidence une action importante de la fumure sur la deuxième période de production, la première production d'octobre étant sensiblement indépendante des apports nutritifs. On note en particulier que les traitements sans azote ne donnent que peu de fleurs au printemps, période de pleine production pour les autres traitements.

Les diminutions ou augmentations de rendement consécutives aux différents traitements, étant particulièrement sensibles au cours de la deuxième cueillette, on peut penser que si les essais avaient été poursuivis pendant un temps plus long, des différences plus marquées auraient été enregistrées. Néanmoins cet essai nous permet de faire un certain nombre d'observations pour les 7 mois de production.

Nous avons analysé séparément la production de matière verte et la production de fleurs, les divers éléments de la fumure pouvant effectivement agir différemment sur le développement végétatif et sur la formation et l'évolution des organes floraux.

1° *Fumure azotée.*

Les quantités d'azote appliquées au mètre carré peuvent paraître excessives puisqu'elles correspondent dans le cas extrême à des apports de 760 unités par hectare et par mois. Nous avons choisi à dessein de telles concentrations pour mettre en évidence les doses limites au-delà desquelles l'élément azote devient un facteur dépressif du rendement. De tels apports se rencontrent d'ailleurs parfois dans la pratique horticole.

Le tableau 2 donne la production de fleurs et la production de matière verte par pied en fonction du taux d'azote apporté. Chaque nombre représente la moyenne de 18 pots de culture soit 36 pieds d'Œillets.

TABLEAU 2

Influence de la fumure azotée sur la production de fleurs, et sur le développement de la plante

Grammes d'azote par mètre carré et par mois	0	10	30	50	75	ppds
Nombre de fleurs par pied	3,4	5,7	6,6	6,3	5,0	P = 0,05 0,72 P = 0,01 0,96
Poids de matière verte par pied (en grammes)	125,1	192,5	189,7	189,1	161,2	P = 0,05 12,7 P = 0,01 16,9

Le nombre de fleurs par pied d'Œillet augmente avec la quantité d'azote apportée jusqu'à la dose mensuelle de 30 g au mètre carré. Entre 30 et 50 g par mètre carré et par mois les différences ne sont pas significatives. Des quantités d'azote supérieures à 50 g au mètre carré ont une action dépressive sur la production de fleurs et sur le développement de la plante.

Contrairement au fait généralement admis que l'azote augmente le développement végétal au détriment de la production florale, nous observons que le développement de la plante, représenté par le poids de matière verte produite par pied, et la production de fleurs suivent des évolutions sensiblement parallèles.

2° *Fumure potassique.*

Les résultats sont consignés dans le tableau 3.

TABLEAU 3

Influence de la fumure potassique sur la production de fleurs et le développement de la plante

Grammes de K par m² et par mois	0	5	15	ppds
Nombre moyen de fleurs par pied	5,05	5,65	5,45	P = 0,05 0,56
Poids de matière verte par pied en grammes	167,7	174,8	172,2	Pas significatif

L'apport supplémentaire de potassium en cours de culture détermine une augmentation significative du nombre de fleurs par pied dès la dose de 5 grammes par mètre carré et par mois, par rapport au traitement sans potasse.

La production de matière verte n'est pas sensiblement modifiée.

Mais il importe de signaler que le traitement K_0 ne peut être considéré comme un témoin carencé en potassium. En effet, la fumure de fond phosphopotassique initiale a élevé à 0,8 pour mille le taux de potasse échangeable du milieu de culture. Nous ne pourrons donc tirer de conclusion que sur l'utilité des apports complémentaires de potasse en cours de culture.

3° *Interaction azote-potasse — Rythme des apports.*

Le tableau 4 met en évidence l'interaction des facteurs N et K et l'influence du rythme des apports sur la floraison.

TABLEAU 4

Interaction N-K, rythme des apports sur le nombre moyen de fleurs par pied pour la période d'octobre à avril inclus

Traitements		K ↓ N →	En grammes par m² et par mois: 0	10	30	50	75
Tous les 10 jours	En grammes par m² et par mois	0	3,3	5,7	6,0	6,3	4,3
		5	3,4	5,3	7,2	6,7	4,5
		15	3,7	6,0	7,2	7,5	5,2
Mensuels		0	3,3	5,3	6,5	5,0	4,8
		5	3,4	6,5	7,3	6,8	5,5
		15	3,7	5,2	5,2	5,3	5,7
Plus petite différence significative		P = 0,05	p.p.d.s. = 1,8				
		P = 0,01	p.p.d.s. = 2,3				

D'une façon très générale, les apports de potassium en cours de culture déterminent une augmentation de la production de fleurs pour toutes les doses d'azote ; une seule exception est à signaler, dans le cas d'apports azotés mensuels avec complément de 15 grammes de potassium par mètre carré et par mois. Dans ce cas, il est vraisemblable que l'apport massif d'éléments fertilisants en une seule fois dans le courant du mois ralentit la formation des boutons floraux par suite de l'augmentation excessive de la concentration de la solution du sol à un instant donné.

L'influence de la salinité sur la floraison se manifeste également pour les forts apports azotés ; de plus, en apports mensuels, la diminution de la floraison, consécutive à des apports azotés trop importants, s'observe plus tôt qu'en apports fractionnés (50 et 75 grammes par mètre carré et par mois respectivement).

TABLEAU 5

Interaction N-K. Rythme des apports sur le poids moyen en grammes de matière fraîche produite par pied pour la période d'octobre à avril inclus

Traitements	K ↓ \ N →	en grammes par m² et par mois: 0	10	30	50	75
Tous les 10 jours	0	127,8	177,3	190,0	167,8	145,6
	5	122,4	205,3	189,6	187,8	184,8
	15	125,0	184,8	181,2	193,7	152,1
Mensuels	0	127,8	198,7	190,5	188,5	161,3
	5	122,4	182,5	206,7	187,6	156,7
	15	125,0	205,4	179,3	208,2	165,8

(K : en grammes par m² et par mois)

Plus petite différence significative: P = 0,05 p.p.d.s. = 31,2; P = 0,01 p.p.d.s. = 41,3

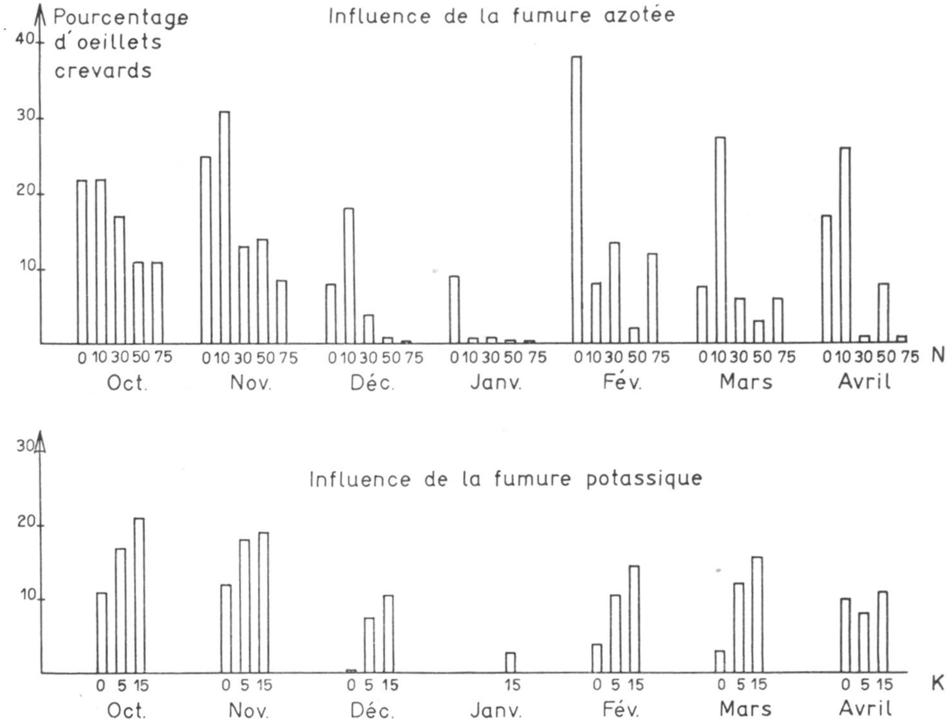
Le tableau 5 qui groupe les productions de matière verte pour chacun des traitements fait ressortir l'action positive hautement significative des apports azotés en cours de culture. Une diminution sensible de la production se manifeste par contre pour des doses d'azote supérieures à 50 g par m². La potasse ne modifie pas sensiblement la production de matière verte. On ne peut également relever d'action sensible du rythme des apports sur le développement.

B. — *Influence de la fertilisation sur la qualité des fleurs récoltées*

L'appréciation de la qualité des fleurs est délicate car il n'existe pas de normes bien définies permettant de différencier l'Œillet « extra » de l'Œillet de premier ou de deuxième choix. En France, le triage est essentiellement subjectif et relatif. A l'étranger, le classement en longueur de tiges est déjà moins arbitraire mais encore très imparfait car il ne tient aucun compte de la vigueur de la tige florale et de la grosseur de la fleur elle-même. Des essais ont été tentés en Belgique pour remédier à

cet état de choses : le poids de la botte de fleurs a été choisi comme élément supplémentaire d'appréciation ; mais la mise en pratique s'est avérée délicate et pour l'instant l'application en est restée à l'état de projet.

En l'absence de normes bien définies et universellement admises, nous avons essayé d'apprécier la qualité des Œillets récoltés dans nos essais sur des bases chiffrées qui tiennent compte plus ou moins directement, de la grosseur de la fleur d'une part, et de la vigueur de la tige d'autre part. Nous avons choisi comme éléments d'appréciation, outre l'éclatement du calice, le poids de la tête florale et le poids du centimètre de tige qui constitue une mesure indirecte du diamètre moyen de la tige florale. Nous avons étudié l'influence de la fumure sur chacun de ces facteurs.

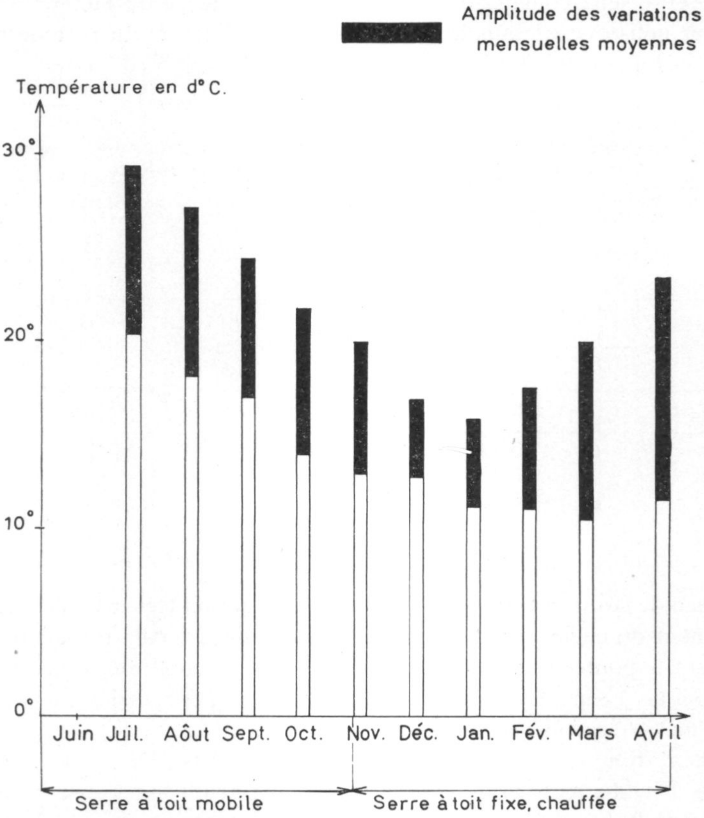


GRAPHIQUE 3. — Pourcentage d'Œillets « crevards », au cours des différents mois, pour les différents traitements.

1° *Éclatement du calice.*

Bien que les causes profondes n'en soient pas encore connues, il est généralement admis que cet accident végétatif est essentiellement lié à des conditions climatiques défavorables et plus précisément à des amplitudes de variations de température, excessives pendant la période de formation de la fleur. Néanmoins il a été signalé que des déséquilibres nutritifs ou des irrégularités dans l'alimentation pouvaient également conduire à une recrudescence des phénomènes d'éclatement. Ces diverses raisons nous ont incités à étudier l'influence de la fumure sur l'éclatement pendant des périodes relativement limitées de façon à dissocier le facteur conditions de milieu, du facteur fumure. Des conditions ambiantes particulièrement favorables à l'éclate-

ment du calice pourraient en effet, dans une certaine mesure, masquer une éventuelle action de la fumure sur ce même phénomène, et inversement. C'est la raison pour laquelle nous avons calculé, pour chaque traitement, le pourcentage d'Œillets à calice fendu, pour chacun des mois de cueillette. Cette séparation mensuelle est évidemment arbitraire, d'autant plus que les conditions de milieu ayant présidé au grossissement du bouton floral sont celles du mois précédent le mois de cueillette. Cependant l'examen du graphique 3 reportant le pourcentage d'éclatement au cours des diffé-



GRAPHIQUE 4. — Variations mensuelles des températures maximum et minimum des serres de culture.

rents mois, pour les différents traitements, met nettement en évidence l'influence des conditions ambiantes sur l'éclatement du calice pour chacun des traitements.

Le minimum d'éclatement se situe au mois de janvier et le maximum aux mois d'octobre et novembre.

Nous avons représenté sur le graphique 4 les courbes de variations mensuelles des températures maximum et minimum des serres de culture dans lesquelles l'essai a été conduit. Nous rappelons que le 25 octobre l'ensemble des pots de culture a été passé de la serre à toit mobile à la serre fermée qui a été chauffée la nuit à partir de fin novembre de façon à maintenir la température nocturne aux environs de 10°C. Ce chauffage d'appoint et le moindre échauffement solaire diurne pendant les mois de décembre et janvier se traduisent par une amplitude de variations de température

beaucoup plus faible au cours de ces deux mois que pendant les mois d'automne et de printemps où l'ensoleillement est plus intense.

Bien qu'il soit impossible de tirer des conclusions définitives sur l'influence des conditions de milieu sur l'éclatement au cours d'un essai qui n'a pas été établi dans ce but, la confrontation des graphiques 3 et 4 permet d'apporter une confirmation à la sensibilité de l'Œillet américain aux brusques variations de températures.

En ce qui concerne l'influence de la fertilisation sur l'éclatement du calice, nous avons représenté séparément sur le graphique 3 l'influence du facteur N et celle du facteur K, et nous avons, dans le tableau 6, dégagé l'action du rythme des apports en fonction des quantités d'éléments N et K apportées.

TABLEAU 6

Pourcentage d'Œillets à calice fendu en fonction de la fertilisation azotée, de la fertilisation potassique et du rythme des apports

Apports	K ↓ N →	0	10	30	50	75
Tous les 10 jours	0	7,7	10,3	2,8	2,6	3,8
	5	24,4	25	11,6	5	3,8
	15	22,7	41,5	21,0	8,9	12,9
Mensuels	0	7,7	15,6	2,6	3,3	3,4
	5	24,4	20,0	6,8	12,1	3,0
	15	22,7	3,2	3,2	0	8,8

L'examen de ces résultats met en évidence une action très marquée de la fumure sur l'éclatement du calice, en effet : l'augmentation de la fertilisation azotée diminue très fortement le pourcentage d'Œillets « crevards » quel que soit le niveau de fertilisation potassique. Le maximum d'éclatement s'observe pour les doses 0 et 10 grammes d'azote par mètre carré et par mois.

L'augmentation des apports potassiques augmente d'une façon générale le pourcentage d'éclatement (graphique 3). Cette augmentation s'observe pour toutes les doses d'azote (tableau 6). Cependant pour la plus forte dose de 15 g de K/m^2/mois, l'action de la potasse dépend du rythme des apports : en apports fractionnés l'éclatement est plus fréquent que pour les doses de potasse plus faibles, alors qu'en apport mensuel, exception faite pour le traitement N = O, on enregistre une diminution marquée du pourcentage de calices fendus.

L'influence du rythme des apports ne se manifeste que pour les forts apports potassiques.

SZENDEL (1938) avait également observé une augmentation de l'éclatement avec les apports fractionnés.

2° *Poids de la fleur.*

La difficulté d'évaluer les dimensions réelles de la fleur, compte tenu de son stade d'épanouissement nous a conduits à déterminer le poids de la tête florale au moment de la cueillette.

Les résultats sont groupés dans le tableau 7 et exprimés en grammes de poids frais.

TABLEAU 7

Influence des divers traitements sur le poids moyen des fleurs récoltées, exprimé en grammes de matière fraîche

Rythme des traitements	K ↓	N →	En grammes par m² et par mois				
			0	10	30	50	75
Tous les 10 jours	En grammes par m² et par mois	0	7,2	6,5	6,5	6,0	6,0
		5	7,2	6,4	6,0	6,1	6,2
		15	7,1	6,4	6,2	6,2	6,1
Mensuels		0	7,2	6,6	6,2	6,2	6,0
		5	7,2	6,3	6,2	6,3	5,4
		15	7,1	6,5	6,5	6,1	6,2
Plus petite différence significative	P 0,05	p.p.d.s. 0,3					
	P 0,01	p.p.d.s. 0,4					

La fumure azotée diminue de façon hautement significative le poids moyen de la fleur, essentiellement entre les doses 0 et 10 grammes par mètre carré et par mois. Les plus grosses fleurs sont obtenues en l'absence de toute fertilisation azotée. Au-delà de 10 grammes d'azote par mètre carré et par mois, l'augmentation du taux d'azote dans la solution fertilisante a une action moins marquée mais encore sensible sur la grosseur de la fleur. Ces observations sont valables pour tous les taux de potassium et quel que soit le rythme des apports. Ces deux derniers facteurs sont sans action sur le poids de la fleur obtenue.

3° *Poids du centimètre de tige.*

Il a été déterminé à partir de la longueur de la tige mesurée au moment de la cueillette et de son poids frais, déduction faite de la fleur proprement dite, des feuilles et des boutures. Il est directement lié au diamètre moyen de la tige, diamètre dont la mesure directe est impossible du fait de la présence de nœuds plus ou moins volumineux et du gradient entre les extrémités inférieure et supérieure.

Les résultats groupés dans le tableau 8 reflètent l'action de la fertilisation sur la vigueur de la tige florale.

L'augmentation de la fertilisation azotée se traduit, au niveau de la tige florale par une augmentation significative du poids du centimètre quand on passe d'un apport mensuel nul à un apport de 10 grammes par mètre carré et par mois, puis, au-delà de 10 grammes par mètre carré et par mois, on note une diminution significative, quels que soient le taux de potassium et le rythme des apports.

L'action du potassium varie avec l'intensité de la fumure azotée :

— en l'absence d'azote et pour les faibles doses en apports fractionnés l'augmentation de la fertilisation potassique diminue de façon significative la vigueur de la tige florale.

— pour les forts apports azotés (N : 75), l'augmentation du potassium dans la fertilisation, augmente le développement de la tige florale.

TABLEAU 8

Poids en milligrammes du centimètre de tige florale

Traitements		K ↓ N→	En grammes par m² et par mois 0	10	30	50	75
Tous les 10 jours	En grammes par m² et par mois	0	126	165	153	139	137
		5	132	154	138	132	140
		15	128	153	131	138	146
Mensuels		0	126	161	152	149	135
		5	132	155	140	134	134
		15	128	165	155	164	141

Plus petite différence significative P = 0,05 p.p.d.s. 6
P = 0,01 p.p.d.s. 8

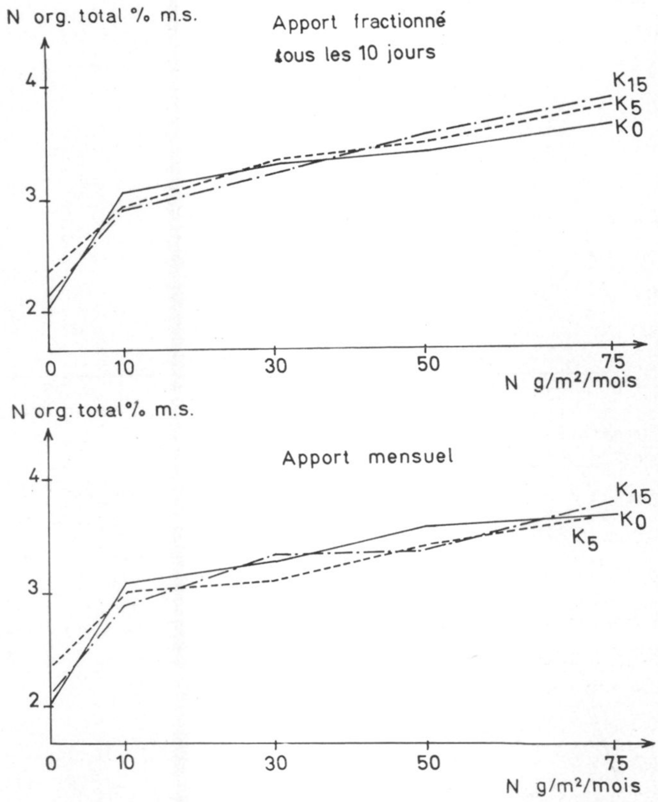
L'influence du rythme des apports varie essentiellement avec les doses de potassium. Pour les apports potassiques les plus faibles (0 et 5 grammes par mètre carré et par mois) le rythme des apports n'a pas d'action sur la vigueur de la tige florale, pour tous les niveaux d'azote. Pour les forts apports potassiques, le rythme de la fertilisation a une action très nette : en apports mensuels, le poids du centimètre de tige florale est sensiblement plus élevé qu'avec des apports plus fréquents. Cependant, dans ce dernier cas, l'augmentation de vigueur peut être directement liée à la moindre production de tiges florales (tableau 4). Il est par suite difficile de tirer des conclusions définitives sur ce point particulier.

IV. — CONTROLE ANALYTIQUE DE LA NUTRITION

Le choix de l'organe retenu pour l'analyse nous a été dicté par la morphologie même de la plante étudiée. La faible surface foliaire, caractéristique de cette espèce, ne permet pas, si on se limite à une feuille d'âge et d'emplacement déterminés, comme l'exige le diagnostic foliaire, d'obtenir un échantillon suffisant pour l'analyse. Nous avons donc choisi le groupe de feuilles, issu d'un bougeon axillaire de la tige florale qui, au stade bouton éclaté, a développé 6 paires de feuilles nettement différenciées, sans élongation des entre-nœuds. Ce groupe de feuilles, à ce stade de développement, constitue la « bouture » couramment prélevée sur Œillet pour assurer la

multiplication végétative des différentes variétés et présente de ce fait un intérêt particulier.

Tout en contrôlant l'influence de la nutrition sur l'équilibre minéral de la bouture, il nous sera possible de définir l'équilibre correspondant à une production maximum et d'apprécier la valeur de ce prélèvement pour l'estimation du niveau alimentaire de la plante.



GRAPHIQUE 5. — Variations de la teneur des jeunes pousses en azote organique total, en fonction des différents traitements.

Dans notre essai, nous avons réuni en un seul échantillon, pour chacun des pots de culture, l'ensemble des boutures prélevées sur la tige florale pendant la période hivernale de novembre à mars.

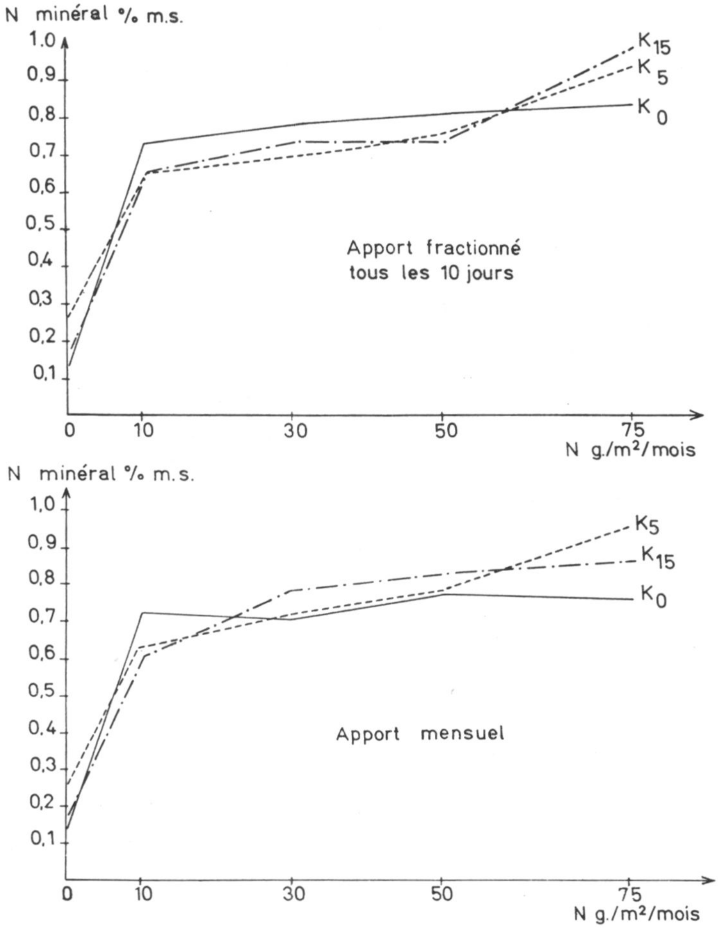
Les déterminations effectuées sont les suivantes :

— azote minéral (nitrique + ammoniacal)
— azote organique total
— potassium
— acide phosphorique
— calcium
— magnésium

A. — *Azote organique total et azote minéral*

Les variations de teneur en azote des boutures en fonction des différents traitements sont représentées sur les graphiques 5 et 6.

L'augmentation des apports d'azote dans le milieu détermine une très forte augmentation de l'azote organique dans la bouture, essentiellement entre les doses

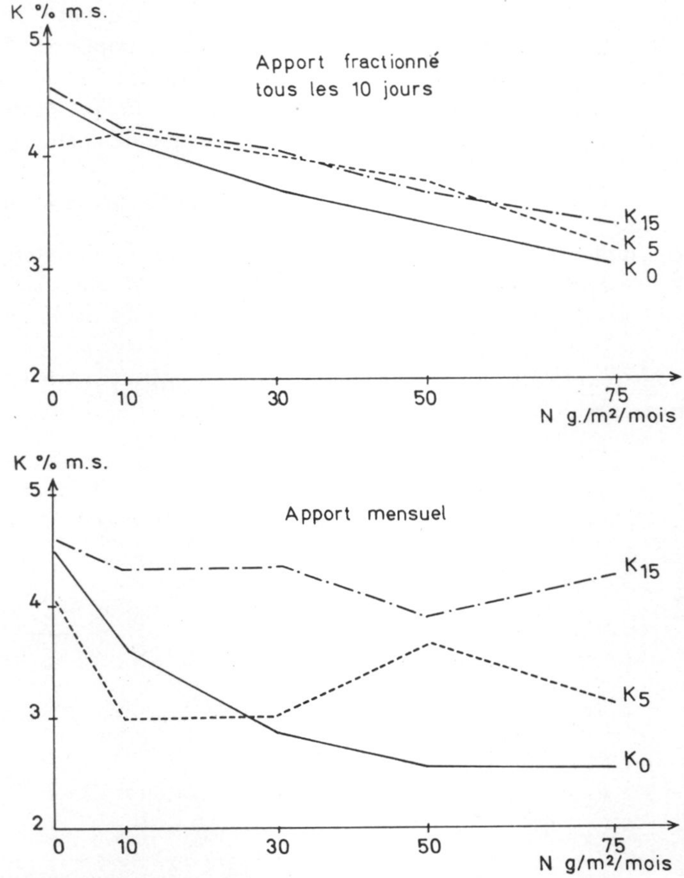


GRAPHIQUE 6. — Variations de la teneur des jeunes pousses en azote minéral en fonction des différents traitements.

0 et 10 g par mètre carré et par mois c'est-à-dire dans la zone d'insuffisance en azote. Au-dessus de 10 grammes d'azote par mètre carré et par mois la concentration en azote organique total de la bouture continue à croître mais beaucoup moins rapidement (graphique 5).

Les courbes de variations de l'azote minéral ont une allure très voisine de celles obtenues pour l'azote organique total mais l'amplitude des variations est beaucoup plus importante. En particulier, pour les doses d'azote excessives qui déterminent une diminution de la production, la teneur en azote nitrique de la bouture augmente beaucoup plus fortement que la teneur en azote organique total.

L'influence du potassium sur la teneur en azote des boutures n'est pas très nette car le sol sur lequel les essais ont été conduits renfermait, au départ, des doses normales en potasse. Ce n'est que pour les fortes doses d'azote dans le milieu que l'addition de potassium détermine une augmentation des teneurs en azote nitrique et en azote organique total des boutures. Le rythme des apports ne détermine pas de grandes variations dans les teneurs en azote des boutures.



GRAPHIQUE 7. — Variations de la teneur des jeunes pousses en potassium en fonction des différents traitements.

B. — *Potassium*

Il importe de rappeler, pour cet élément, que le traitement K_0 ne représente pas une carence absolue en potassium. L'incorporation à la terre d'une fumure de fond phosphopotassique a amené le mélange de culture à une teneur en potasse échangeable de 0,8 pour mille. Ceci permet d'expliquer que, pour le traitement K_0 la teneur en potassium des boutures (graphique 7) est à peine inférieure à celle des traitements K_5 et K_{15}, en apports fractionnés.

Par contre la teneur en potassium des boutures est particulièrement sensible à la quantité d'azote apportée et aux rythmes des apports effectués.

L'augmentation des apports azotés détermine une diminution progressive de la teneur en potassium des boutures, quand l'azote est apporté de façon fractionnée. Cette diminution est d'autant moins importante que les apports d'azote sont accompagnés d'apports de potasse. Avec des apports azotés mensuels ces variations sont beaucoup plus accentuées. Le taux de potassium des boutures diminue rapidement avec l'augmentation des apports azotés si la fumure ne comporte pas d'apports complémentaires de potassium. Pour maintenir le taux de potassium à un niveau satisfaisant il faut prévoir des apports importants de potassium. Le taux de potassium dans les boutures ne peut être maintenu que dans la mesure où l'on fournit à la plante une quantité importante de potassium en même temps que de l'azote.

C. — *Acide phosphorique — Calcium — Magnésium*

Pour l'ensemble des traitements, ces trois éléments sont maintenus constants dans le milieu de culture. Les variations éventuelles de leur concentration dans les boutures seront le résultat d'une action indirecte des variables N, K ou rythme des apports.

Nous avons réuni dans un même tableau (tableau 9) les teneurs en P_2O_5, Ca et Mg des boutures prélevées pour chacun des traitements.

TABLEAU 9

Composition en acide phosphorique, calcium et magnésium des boutures prélevées en cours de culture, pour chacun des traitements

Élément dosé	K ↓ N →	Apports azotés fractionnés					Apports azotés mensuels				
		N_0	N_{10}	N_{30}	N_{50}	N_{75}	N_0	N_{10}	N_{30}	N_{50}	N_{75}
P_2O_5 % de mat. sèche	K_0	0,64	0,82	0,72	0,72	0,63	0,64	0,92	0,92	0,81	0,73
	K_5	0,65	0,74	0,78	0,72	0,60	0,65	1,07	1,02	0,64	0,59
	K_{15}	0,67	0,76	0,73	0,70	0,61	0,67	0,72	0,81	0,70	0,62
Ca % de mat. sèche	K_0	1,44	1,68	1,65	1,62	1,45	1,44	1,58	1,63	1,64	1,66
	K_5	1,78	1,50	1,57	1,51	1,74	1,78	1,55	1,57	1,59	1,83
	K_{15}	1,51	1,53	1,57	1,54	1,81	1,51	1,41	1,28	1,46	1,51
Mg % de mat. sèche	K_0	0,39	0,41	0,44	0,40	0,33	0,39	0,43	0,41	0,44	0,43
	K_5	0,38	0,46	0,49	0,41	0,45	0,38	0,35	0,40	0,38	0,50
	K_{15}	0,38	0,40	0,37	0,41	0,44	0,38	0,39	0,43	0,40	0,44

Pour les apports azotés fractionnés, l'examen du tableau 9 ne fait ressortir que de faibles variations dans la composition des boutures, malgré de grandes variations dans les apports d'azote et de potasse. Deux observations méritent cependant d'être soulignées :

1° l'augmentation de l'acide phosphorique quand on apporte de l'azote dans le milieu ;

2° la légère diminution du taux de calcium quand on apporte de la potasse sous forme soluble en cours de culture, sauf pour les traitements N_0 et N_{75}, quand la plante se développe en milieu carencé ou trop riche en azote, c'est-à-dire dans des conditions de nutrition anormales.

En apports mensuels, les observations précédentes restent valables, mais les variations observées sont fortement accentuées, aussi bien pour P_2O_5 que pour Ca.

La teneur en magnésium est peu influencée par les apports d'azote et de potasse, aussi bien que par le rythme des apports.

V. — DISCUSSION ET CONCLUSION

Le système radiculaire de l'Œillet, dont la majeure partie est localisée, en pleine terre dans les 25 centimètres superficiels, dispose, dans le système cultural que nous avons utilisé, d'un volume de terre sensiblement égal à celui qu'il exploite dans des conditions de cultures normales. Par contre, dans nos essais, l'absence de lessivage, nous permet de maintenir dans la masse de sol exploité, la totalité des éléments apportés, ce qui est impossible à réaliser en pleine terre : les arrosages plus ou moins abondants suivant les saisons entraînent hors de portée des racines, une quantité d'éléments fertilisants difficile à chiffrer.

Il convient donc de considérer, dans l'interprétation des résultats obtenus, qu'à apport égal d'éléments fertilisants au mètre carré de surface cultivée, la quantité réellement mise à la disposition des plantes sera, d'une façon générale, plus importante dans notre dispositif cultural qu'elle ne le serait en pleine terre.

A. — *Fertilisation et production*

Les doses expérimentées au cours de notre essai, qui correspondent à des fumures normales en culture florale intensive ont déterminé des variations très sensibles de rendement et de qualité.

Du point de vue quantitatif, les apports d'azote en cours de culture déterminent une augmentation sensible et immédiate de la production, dès la dose de 10 grammes par mètre carré et par mois. Cet accroissement de la production par la fertilisation azotée se maintient jusqu'à des apports mensuels de 30 à 50 grammes. Ce n'est qu'à partir de la dose mensuelle de 75 grammes qu'apparaît une action dépressive sur la production.

Les apports potassiques seuls, sans complément azoté, n'ont aucune action sur la production. Par contre, à dose modérée (5 grammes par mètre carré et par mois), le potassium détermine une augmentation de la production à tous les niveaux d'azote testés : il apparaît ainsi comme un complément indispensable de la fertilisation azotée. Les apports les plus importants (15 grammes par mètre carré et par mois) ne stimulent le développement des tiges florales que dans la mesure où ils sont suffisamment fractionnés et ne peuvent donc être effectués qu'avec discernement.

L'influence très nette du rythme des apports sur la production montre la grande sensibilité de l'Œillet à l'excès temporaire de salinité du sol. En effet des différences

apparaissent pour un même traitement selon que la totalité de la fumure mensuelle est apportée en une seule fois ou fractionnée en plusieurs apports : des doses d'azote de 50 g par mètre carré et par mois apportées en trois fois déterminent par rapport au traitement à 30 g une augmentation de production, alors que le même apport effectué en une seule fois provoque une diminution de production. De même, le traitement K15 diminue très fortement la production sous forme d'un apport unique mensuel et l'augmente en apports fractionnés pour une même dose d'azote.

Le fractionnement des apports permet donc l'utilisation de doses très importantes de fertilisants sans que la concentration en sels du sol n'atteigne le seuil critique. Cette sensibilité à une augmentation accidentelle et passagère de la salinité nous amène à préciser l'importance du choix des sels à utiliser. Si, généralement la nature des engrais dépend des types de sols et de cultures, dans le cas particulier de l'Œillet, leur choix est essentiellement conditionné par les quantités exceptionnellement élevées qu'exige cette culture : les besoins très importants en azote et en potasse la sensibilité de l'espèce à la concentration saline du milieu impliquent l'emploi de sels apportant le maximum d'éléments fertilisants dans le minimum de poids. C'est la raison pour laquelle nos essais ont été effectués avec le nitrate d'ammonium et le nitrate de potassium. En effet, à doses égales d'azote et de potassium, l'utilisation d'un mélange de chlorure de potassium et de nitrate de sodium par exemple, doublerait la concentration saline de la solution apportée au sol par rapport à celle que nous avons utilisée ; l'action favorable des éléments N et K serait vraisemblablement masquée par un excès de salinité. Il en résulte que les résultats obtenus dans nos essais, pour les diverses doses d'azote et de potasse ne nous paraissent valables que dans la mesure où les éléments sont fournis exclusivement sous la forme de nitrates d'ammonium et de potassium.

De plus, l'introduction dans le milieu de culture de quantités importantes d'ions non utilisés (Cl et Na dans l'exemple choisi) augmenterait progressivement et de façon irréversible la salinité du milieu de culture. Ce problème est de toute première importance pour des cultures sous serre dans un milieu soustrait à l'action lessivante des eaux de pluie.

Enfin, la ferti-irrigation, qui est la technique la mieux adaptée à la fertilisation échelonnée impose l'emploi de sels entièrement et rapidement solubles tels que ceux que nous avons utilisés.

Du point de vue qualitatif, l'examen de nos résultats fait apparaître une certaine antinomie entre les facteurs quantité et qualité. Au maximum de production ne correspond pas la qualité optimum. En effet, l'augmentation du nombre de fleurs produites par pied détermine une diminution de la vigueur de la tige et de la grosseur de la fleur ; par ailleurs, les apports fractionnés tous les 10 jours, favorables à une production élevée, déterminent, par contre, une aggravation de l'éclatement du calice.

B. — *Contrôle de la nutrition*

La trop faible quantité de matériel végétal ne nous a pas permis de suivre l'évolution dans le temps de l'équilibre minéral. Nous n'avons donc pu que réunir en un seul et même échantillon, les jeunes pousses développées durant l'expérimentation de sorte que les résultats analytiques ne représentent, en fonction de N et de K, que les variations de l'équilibre minéral moyen de jeunes pousses d'âge et d'emplacement

sensiblement différents, développées dans des conditions ambiantes variables. Malgré ce, les variations relatives des éléments étudiés permettent quelques observations intéressantes.

Azote. — Les variations des teneurs en azote des boutures pour les divers équilibres de la fumure reflètent avec suffisamment de fidélité les variations de la composition du milieu. Il semble que la détermination de l'azote minéral dans ces jeunes pousses en voie de croissance puisse permettre le contrôle de la nutrition azotée. En effet, le maximum de production s'accompagne de quantités importantes d'azote minéral dans les jeunes pousses analysées. Par ailleurs les variations dans les teneurs du végétal en azote organique total quoique plus faibles, sont cependant suffisantes pour diagnostiquer une insuffisance d'azote dans le sol.

Potassium. — Comme nous l'avons déjà signalé une fumure de fond potassique nous a placés dans des conditions telles que, même en l'absence d'apports complémentaires en cet élément, la teneur des boutures s'est maintenue à un niveau normal. Nous avons pu cependant noter une diminution rapide du potassium en relation avec l'augmentation des apports azotés. Cette observation montre l'intérêt tout particulier de la connaissance de l'équilibre N-K dans la plante.

Ces premiers résultats ne nous permettent pas de tirer de conclusions définitives mais ils nous ont cependant paru suffisamment encourageants pour nous inciter à entreprendre une étude plus complète afin de préciser la valeur du test analytique des boutures dans le contrôle de la nutrition de l'Œillet.

Reçu pour publication en décembre 1961

SUMMARY

STUDY OF THE FERTILIZING OF CARNATIONS

Investigations on the fertilizing of carnations under intensive cultivation led to the following conclusions :

1) Heavy doses of mineral nitrogen, up to 400 g per square metre annually, are indispensable for a continued and abundant production of flowers throughout the year.

2) Nitrogen fertilizing should be supplemented with potassium at the annual rate of 100 g per square metre, in order to maintain a favourable equilibrium of nitrogen and potassium in the plant's nutrient supply.

3) The high rates of fertilizers recommended involve a technique of split application (about every ten days) of highly available N and K salts, in order to avoid a temporary increase in the concentration of the soil solution at the time of treatment and to exclude the hazards of an excessive and constant accumulation of non-absorbed ions in the nutrient medium (So_4, Cl, Na).

4) It is difficult to reconcile quantity with quality : the increase in number of flowers produced generally decreases the strength of stalks and the weight of flowers.

5) Mineral analysis of cuttings from the flower stalks showed a high sensitivity of cuttings to variations of N and K in the soil. More detailed studies in this field should enable a control of nutrition during the growth of the plant.

ZUSAMMENFASSUNG

ZUR DUNGUNG DER NELKE

Das studium der Nelendüngung in intensiven Anbau erlaubte uns folgende Schlussflogerungen :

1) Grosse Mengen mineralischen Stickstoffs, die 400 g pro qm und Jahr erreichen, sind notwendig, um eine laufende un reichliche Blüternte während des ganzen Jahres zu erzielen.

2) Die Stickstoffdüngung muss durch eine Kalidüngung von 100 g Kali pro qm und Jahr ergänzt werden, damit ein gutes Gleichgewicht Stickstoff-Kali in Boden un Pflanze gesichert wird.

3) Die empfohlenen starken Düngermengen bedingen die Anwendung einer fraktionnierten Düngungstechnik (ugf alle 10 Tage) mit gänzlich assimilierbaren Nährsalzen, die nur N und K beibringen, einerseits um eine vorübergehende Erhöhung der Bodenlösungskonzentration im Augenblick des Ausbringens zu verhindern, und andrerseits um eine über mässige und konstante Ansammlung der nicht aufgenommenen Ionen (SO_4-Cl-Na) auszuscheiden.

4) Es itst schwierig, Menge und Qualität zu vereinbaren : eine Zunalme der Blüten zieht gewöhnlich eine Verringerung der Stengelkraft und des Blütengewichts nach sich.

5) Die mineralische Untersuchung der vom Blütenstengel entfernten Stecklinge zeigt eine genügende Empfindlichkeit der Stecklinge gegenüber N und K-Schwankungen im Boden, um weitere Untersuchungen auf diesem Gebiete zu rechtfertigen, mit dem Zwecke, die Ernährung während der Kultur zu prüfen.

Опыт удобрения гвоздики.

Д. БЛАН — Антиб.

Опыт удобрения интенсивной культуры гвоздики позволил вывести следующие заключения :

1. Массивные подкормки, до 400 грамм на квадратный метр за год, минеральным азотом, необходимы для получения постоянной и обильной продукции цветов в течении круглого года.

2. Азотистые удобрения должны быть допнонены удобрениями калиевыми в количестве 100 грамм К на квадратный метр за год дабы поддержать номальное соотношение азот-калий как в среде, так и в самом растении.

3. Предлагающиеся крупные подкормки принуждают рпиносить удобрения порционым порядком (приблизительно каждые 10 дней), применяя при этом только полностью усвояемые соли, содержащие исключительно элементы N и К, дабы, с одной стороны, избежать временного увеличения концентрации почвенного раствора в момент подкормки, а с другой, чтобы отстранить риск постоянного и излишнего накопления не всоссанных ионов (SO_4 -- Cl – Na) в среде культуры.

4. Трудно сочетать количество и качество : увеличение количества цветов вызывает в бо́льшинстве случаев уменьшение крепости цветочного стебля и веса цветка.

5. Анализ минералов заключавшихся в черенках взятых со цветочных стеблей указал на такую чувствительность черенка к изменениям соотношения N и К в почве, что встает необходимость провести новые изследования в этой области и проверить питание растений на всем протяжении культуры.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ARNAUD J., 1958. La situation des cultures florales dans les Alpes-Maritimes — Aspect technique et économique. *B. T. I.*, **133**, 481-489.

BEACH G., 1952. Effect of ammonium sulfate and potassium chloride on Patrician Carnations in soil. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **59**, 484-486.

BEACH G., MUSSENBROCK A., 1948. Effect of nitrogen and potash fertilizers on Patrician Carnations in soil. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **52**, 487-489.

BLANC D., 1961. Évolution de la production de l'Œillet. Incidences sur la fertilisation. *C. R. Acad. Agric.* 464-467.

CHAN A. P., HEENEY H. B., MAGINNESS E. A., CANNON H. B., 1958. Mineral nutritional studies on Carnation. — Effect of N, P, K, Ca and temperature on flower production. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **72**, 473-476.

CLAPP R., FOLLEY G. E., 1941. Nutritional symptoms in Carnation. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **38**, 673, 678.

DORNER H. B., MUNCIE F. W., NEHRLING A. H., 1914. The use of commercial fertilizers in growing Carnations. *Ill. Agr. Exp. Sta. Bul.*, 176.

DROUINEAU G., 1961. La fertilisation de l'Œillet. Journées florales des Alpes-Maritimes. D. S. A. de Nice, juin 1961.

HOLLEY W. D., 1954. Potassium, sodium and calcium nutrition of Carnations. Part 2. *Colo. Flow. Gro. Bul.*, 60.

HOLLEY W. D., 1955. Carnations are not sensitive to different soil phosphorus levels. *Colo. Flow. Gro Bul.* 70.

HOLLEY W. D., WAGNER D. L., FARMER R., 1951. The response of Carnation varieties William Sim and White Patrician to various levels of nitrate and soil moisture. *Colo. Flow. Gro. Bul.*, 26.

HOLLEY W. D., WAGNER D. L., FARMER R., 1952. The response of Carnation varieties William Sim and White Patrician to various levels of nitrate and soil moisture (continued from Bull. 26). *Colo. Flow. Gro. Bul.*, 27.

LUNT O. R., KOHL., KOFRANEK., 1958. Carnation production reduced by low salt concentrations. *Flor. Exch.*, **130**, 15-48.

LUNT O. R., SCIARONI R. H., BOWLES E. J., 1953. Studies of fertility control of commercialy grown carnations. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **61**, 523-527.

MESSING J. H. L., 1958. Mineral nutrition of Carnations. *J. Sci. Food Agric.*, **9**, 228-234.

PETERSON R., HOLLEY W. D., 1960. Phosphoric acid and mono-calcium phosphate compared as sources of phosphorus for carnations. *Colo. Flow. Gro. Bul.*, 126.

PUCCINI G., 1954. Ricerche sulla nutrizione del Garofano rifiorente della Riviera. *Ann. Sper. Agr.*, **8**, 613-627.

PUCCINI G., 1956. Ricerche sulla nutrizione del Garofano rifiorente della Riviera. Secondo contributo. *Ann. Sper. Agr.*, **10**, 1495-1510.

SZENDEL A. J., 1938. Calyx splitting of Carnation flower. Preliminary report on nutritional experiments. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci.*, **35**, 781-787.

SZENDEL A. J., 1939. Symptoms of potassium deficiency on Carnations plants. *Proc. Amer. Soc. Hort. Sci* **37**, 1012.

WARD C. W., 1903. *The American Carnation* 66-69, A. T. De La Mare Printing and Publishing Company, New York.

Ann. agron., 1961, **12**, (6), 599-608.

631. 425. 2

MÉTHODE DE DÉTERMINATION DES RÉSERVES HYDRIQUES DES SOLS

R. STUDER
avec la collaboration technique de J. BLASKIEWICZ
Station agronomique, Châteauroux, (Indre).

SOMMAIRE

Il est décrit une méthode de détermination des réserves en eau des sols. Avec du matériel de laboratoire courant, les méthodes par centrifugation (entre pF 2,0 et 4,2) et par hygroscopicité (entre pF 4,7 et 6,2) permettent d'élaborer des courbes de pF avec une précision de l'ordre de 5 p. 100. Les résultats obtenus ont été vérifiés par rapport à d'autres méthodes (méthode de RICHARDS en particulier) et offrent une bonne concordance avec les profils hydriques au champ.

I. — INTRODUCTION

La détermination des réserves hydriques des sols peut être facilement réalisée au laboratoire en utilisant les différentes méthodes de mesures des pF. Toutefois, il faut faire appel à plusieurs méthodes pour pouvoir élaborer une courbe complète de pF, (1) car chacune d'entre elles n'est valable que dans des gammes de pF assez restreintes. (fig. 1).

Dans le présent travail, nous nous sommes efforcés d'utiliser le minimum de méthodes nécessaire à l'élaboration d'une courbe de pF. Ainsi il est possible d'obtenir ces courbes, avec du matériel de laboratoire courant, au moyen de deux méthodes seulement : l'hygroscopicité et la centrifugation.

II. — MÉTHODES DE DÉTERMINATION UTILISÉES

Lorsque le sol n'est pas saturé, la dynamique de l'eau est influencée par les forces de liaison intervenant entre l'eau et le sol : c'est le potentiel capillaire ψ.

SCHOFIELD (1935) a proposé de représenter la variation du potentiel capillaire ψ par son logarithme, exprimé par le symbole pF, en fonction de l'humidité en pour cent. de terre sèche (fig. 1).

L'élaboration d'une courbe de pF revient donc à mesurer la variation du potentiel capillaire par les méthodes précitées.

(1) pF = log ψ (ψ = potentiel capillaire).

A. — Les techniques retenues et leurs principes

1. *L'hygroscopicité* (Hallaire 1953).

Le principe est le suivant : on peut démontrer que les énergies libres de l'eau sont les mêmes dans les deux phases liquide et vapeur.

Il est possible d'abandonner un échantillon de terre dans une atmosphère dont la température et le degré hygrométrique sont connus. L'échantillon se mettra en équilibre hydrique avec l'humidité de l'atmosphère. L'équilibre atteint, il suffira alors de doser l'humidité de l'échantillon et de déterminer le pF au moyen de la formule ci-dessous pour avoir un point de la courbe :

$$\psi\,(\mathrm{g}\cdot\mathrm{cm}) = 10{,}833\ \mathrm{T}\log\frac{100}{e}$$

avec T température absolue de l'atmosphère
e degré hygrométrique en p. 100.
puis $\log\psi = \mathrm{pF}$.

La méthode par hygroscopicité n'est utilisable que pour des ψ élevés, comme le montre le tableau 1 suivant :

TABLEAU I

ψ	0	1 000	10 000	20 000	50 000	100 000	500 000	10^6
pF	0	3,0	4,0	4,3	4,7	5,0	5,7	6,0
e	100	99,9	99,2	98,6	95,4	92,6	69,0	50,0

Le contrôle du degré hygrométrique se faisant avec une précision suffisante au-dessous de e = 95 p. 100 ; la méthode est pratiquement utilisable entre les pF 4,7 et 6,2.

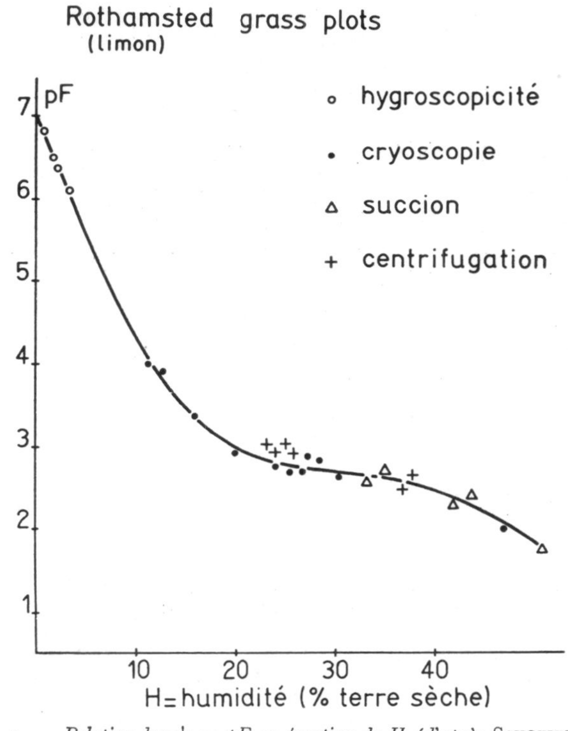


Fig. 1. — *Relation log ψ = pF en fonction de H (d'après* Schofield*).*

2. La centrifugation.

Si l'on soumet un creuset contenant de la terre humide à une accélération donnée γ dans un plan donné, la terre se désséchera jusqu'à ce que le potentiel capillaire ψ ait atteint la valeur correspondante à cette accélération.

La centrifugation étant un mouvement circulaire uniforme, nous avons :

$$\gamma = \frac{v^2}{R} \quad \text{avec} \quad v = \text{vitesse}, \quad R = \text{rayon}$$

or

$$v = 2\pi RN \quad N = \text{nombre de tours/seconde}$$

d'où

$$\gamma = \frac{4\pi^2R^2N^2}{R} = 4\pi^2RN^2 = g.\ \psi.$$

g accélération de la pesanteur.
ψ potentiel capillaire.

Donnons à γ quelques valeurs :

si γ = 100 g	ψ = 100	pF = 2,0
si – = 1 000 g	– = 1 000	pF = 3,0
si – = 5 000 g	– = 5 000	pF = 3,7
si – = 16 000 g	– = 16 000	pF = 4,2

Il suffit donc de connaître N et R avec précision pour obtenir des pF dans la gamme allant de 2,0 à 4,2.

Si l'on tient compte de ce qu'un échantillon de terre séché à l'étuve à 105°C correspond à un pF = 7,0, on pourra tracer la courbe de pF :

de pF 2,0 à 4,2 par la méthode centrifugation ;
4,7 à 6,0 par la méthode hygrocospicité ;
et pF 7,0 correspond à une humidité nulle.

Il est ensuite facile de raccorder entre elles les gammes de pF.

B. — Le matériel employé

1. *Hygroscopicité* (Hallaire : *données non publiées*).

Il est possible d'utiliser deux techniques :

— la technique à l'air libre : il faut disposer d'une pièce où la température et l'hygrométrie restent relativement constantes à l'échelle de la journée (cave).

— la technique en atmosphère confinée (armoires étanches).

a) *La technique à l'air libre.*

C'est la technique la plus commode. Toutefois, elle ne permet d'obtenir qu'un point de la courbe de pF. Le degré hygrométrique d'une cave reste suffisamment constant à l'échelle d'une journée, même s'il varie dans de fortes proportions au cours de l'année (humidité relative de 50 à 75 p. 100 et plus). Il suffit de disposer sur une table un support grillagé permettant une bonne circulation de l'air et d'y déposer les échantillons de terre. Un ventilateur assez puissant, fixé à 3 ou 4 mètres des des échantillons, brasse l'atmosphère. Un psychromètre est installé à proximité des échantillons, donnant la température (thermomètre sec) et le degré hygrométrique.

b) *La technique en atmosphère confinée.*

Lorsque l'on place une solution saturée d'un sel, en contact avec un excès de ce sel, dans une enceinte étanche et à une température donnée, la solution saturée entretient une humidité constante (constantes d'humidité des sels minéraux).

On peut utiliser de nombreux corps chimiques. Nous citons ci-dessous (tableau 2) certains d'entre eux en fonction de pF obtenu.

TABLEAU 2

Composés chimiques		e %	à t°C	pF correspondant
SO_4Na_2,	10 H_2O	93	20	5,0
$ClNH_4$,		79,5	20	5,5
$(NO_3)_4Mg$,	6 H_2O	56	18,5	5,9
$(NO_3)_2Ca$,	4 H_2O	56	18,5	5,9
Cl_2Ca,	6 H_2O	35	18,5	6,2

Il est recommandé d'utiliser des armoires vitrées, étanches. On dispose à l'intérieur un plateau grillagé supportant les échantillons de terre, un psychromètre précis pour déterminer la température et l'humidité relative. Un petit ventilateur, à très faible vitesse de rotation, suffit à brasser l'atmos-

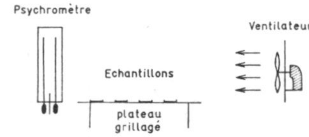


FIG. 2. — *Matériel paur hygroscopicité.*

phère confinée. Seule l'hélice se trouve dans l'enceinte, le moteur électrique doit rester à l'extérieur. (échauffement), (fig. 2).

Les récipients contenant les échantillons de sols sont des petites boîtes en aluminium (forme boîte de Pétri).

2. *La centrifugation.*

Le matériel utilisé est le suivant :

a) *La centrifugeuse et ses équipements.*

— Une centrifugeuse réfrigérée ou refroidie par courant d'eau.
— un compte-tours précis (tolérance $\pm$ 50 tours/minute) ;
— une étoile pour centrifugation horizontale (jusqu'à 4 000 tours/minute) avec 4 pots de 4 tubes de 50 cc environ, soit 16 tubes (en nylon) ;
— une couronne pour centrifugation oblique de 4 pots de 50 cc (5 000 à 10 000 tours/minute) ;
— facultativement, une couronne adaptée à une vitesse plus grande pour obtenir le pF = 4,2 (15 000 à 20 000 tours/minute)).

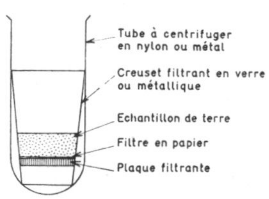


FIG. 3. — *Matériel pour centrifugation.*

b) *Récipients pour échantillons* :

— creusets filtrant en verre pyrex (Ø 30 mm) pour la centrifugation horizontale. Porosité I. (fig. 3).
— creusets filtrants métalliques (Ø 30 mm) pour la centrifugation oblique.

C. — Conduite des déterminations

1. *L'hygroscopicité.*

Comme de nombreux auteurs l'ont montré, (Demolon, Hallaire, Schofield...), la courbe de pF obtenue en désséchant un sol, diffère de celle obtenue en le réhumectant. Les échantillons sont préparés la veille ; une épaisseur de terre de 1 à 2 mm est déposée dans les boîtes en aluminium ; une série est placée dans une atmosphère très humide (voisine de l'humidité relative de 100 p. 100), la série homologue est mise à l'étuve à 60 - 70 °C.

On dispose le lendemain matin, les échantillons sur le plateau grillagé et on les abandonne 8 à 10 heures. Ce délai suffit à atteindre l'équilibre. A l'équilibre, on note la température et l'humidité relative. On ferme ensuite les boîtes et on fait l'humidité. On calcule, par ailleurs, le pF obtenu.

2. *La centrifugation.*

Cette méthode ne permet d'obtenir que la courbe de pF en désséchant le sol. La veille, on place les creusets filtrants dans un bac que l'on remplit progressivement d'eau jusqu'au niveau de la plaque filtrante (attention aux bulles d'air qui pourraient rester sous le filtre). On dispose un papier filtre sur la plaque filtrante. On verse l'échantillon jusqu'à concurrence d'une épaisseur de 8 à 10 mm. On tasse légèrement. On abandonne jusqu'au lendemain pour avoir une bonne humectation.

Le lendemain les creusets filtrants sont déposés dans les tubes à centrifuger et on centrifuge 30 minutes à la vitesse voulue. On note l'épaisseur de terre. On transvase l'échantillon en capsules tarées et on dose l'humidité. On mesure enfin le rayon moyen entre le milieu de la couche de terre et l'axe de la centrifugeuse, rayon moyen qui sera utilisé pour calculer le pF. Une variabilité de l'épaisseur de l'échantillon de 1 à 2 mm ne modifie le pF que de 1 à 2 centièmes d'unité.

Dans le cas de sol très argileux ou à mauvaise structure, il est recommandé d'utiliser des échantillons de plus faible épaisseur (2 à 4 mm).

III. — RÉSULTATS OBTENUS

A. — Quelques exemples de courbes de pF. leur précision

Actuellement, nous réalisons les pF suivants pour élaborer une courbe :

— à la centrifugeuse : pF	2,5 (étoile)	à	1 500 t/mn	R = 12 cm
	2,7		1 900	
	2,95		2 500	
	3,10		2 900	
	3,35		4 200	
	3,70 (couronne)		8 800	R = 6,2 cm
	3,75		9 000	
— par hygrocopicité :	5,0		(SO_4Na_2, $10H_2O$)	
	5,5 à 5,85		(air libre)	
— séchage à l'étuve à 110°C	7,0			

soit 10 points.

Au départ, toutes les mesures pour un échantillon étaient faites en triple exemplaire. Devant la bonne concordance des résultats, on peut se limiter à des doubles, en acceptant une différence maximum de 5 p. 100 (tableau 3). Les résultats s'écartent souvent pour les pF situés vers 3,5 à 3,8. Il suffit alors de réaliser deux points voisins en double et de faire la moyenne des 4 nombres obtenus.

Avec le matériel cité ci-dessus, il est possible de déterminer 16 courbes de pF par semaine. Toutefois l'emploi du temps journalier du manipulateur n'est pas complet et une autre série de 8 courbes par semaine peut-être ajoutée.

TABLEAU 3

Numéros		pF	% humidité	Moyenne d'humidité
			par centrifugation	
a 1		2,48	24,7	24,5
2			24,2	(± 0,3)
b 1		2,68	22,4	22,3
2			22,2	(± 0,1)
c 1		2,95	20,5	20,7
2			20,8	(± 0,2)
d 1		3,08	20,5	20,4
2			20,3	(± 0,1)
e 1		3,34	18,8	18,7
2			18,6	(± 0,1)
f 1		3,68	14,0	14,2
2			14,3	(± 0,2)
g 1		3,74	12,5	13,1
2			13,7	(± 0,6)
			par hygroscopicité	
h 1	D*	5,24	4,7	
2			4,6	4,8
3			5,0	(± 0,2)
j 1		5,24	4,9	
2	R**		5,0	5,0
3			5,0	(± 0,1)
k 1		5,85	3,2	
2	D		2,6	3,0
3			3,3	(± 0,3)
l 1		5,85	3,0	2,8
2	R		2,6	(± 0,2)
3			2,8	

* D par dessiccation **R par réhumectation

Les résultats obtenus sont illustrés par quelques exemples de courbes. Monsieur HALLAIRE a aimablement réalisé quelques courbes de pF par la méthode dite par pression (marmite de RICHARDS). La comparaison est possible sur les figures 4 et 5.

B. — Comparaison des résultats avec quelques profils hydriques au champ

Nous suivons quelques profils hydriques tout au long de l'année à raison de 1 sondage par mois environ. Par cette méthode, nous pouvons déterminer de façon approximative le dessèchement maximum d'un sol ainsi que le taux maximum de rétention de l'eau (capacité au champ). Deux exemples (fig. 6 et 7) montrent que les résultats donnés au laboratoire se rapprochent bien des résultats obtenus au champ.

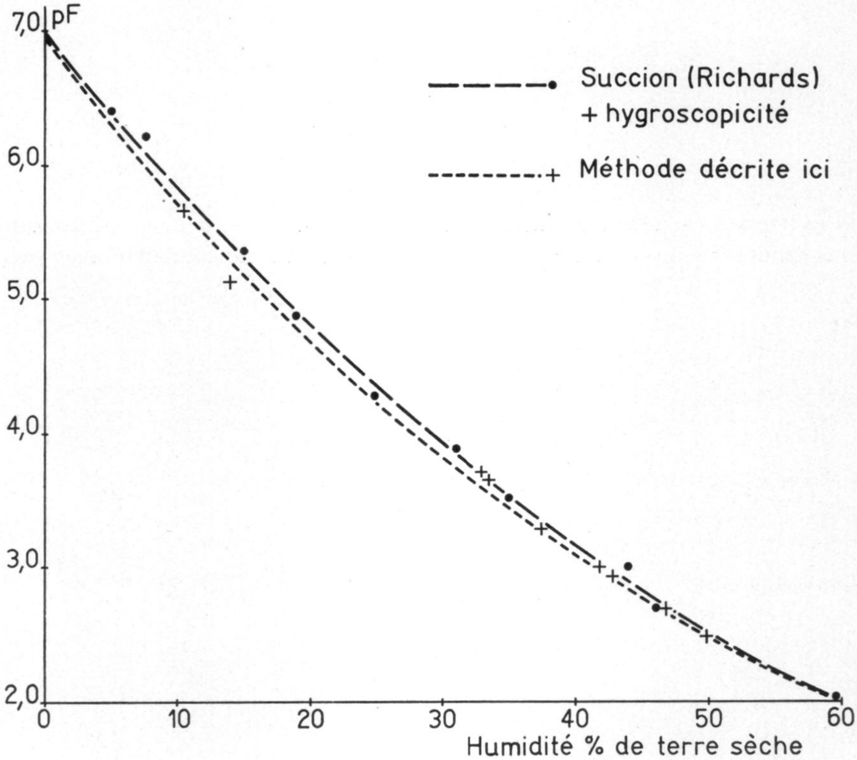


FIG. 4. — *Courbes de* pF *comparées.*
Terre n° A 344-4 (83,6 *p.* 100 *d'argile*).

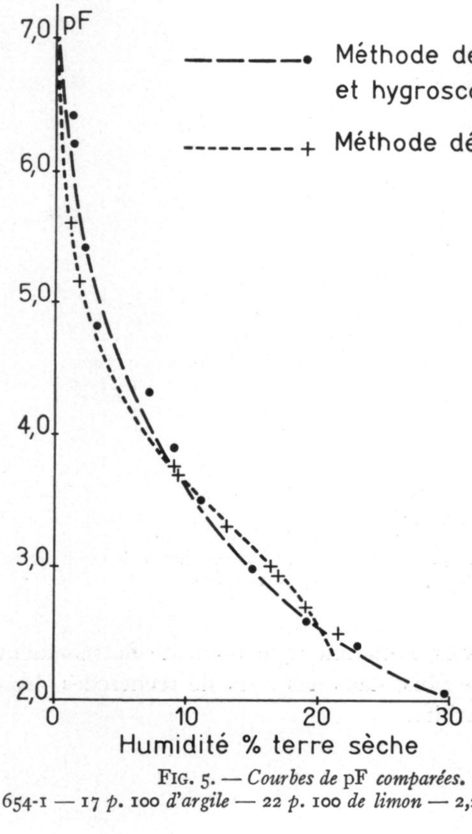


FIG. 5. — *Courbes de* pF *comparées.*
Terre n° A 654-1 — 17 *p.* 100 *d'argile* — 22 *p.* 100 *de limon* — 2,2 *p.* 100 *de matière organique.*

IV — CONCLUSION

Les irrigations de complément se développant de plus en plus, même dans des régions réputées semi-humides, il est apparu intéressant de connaître avec précision

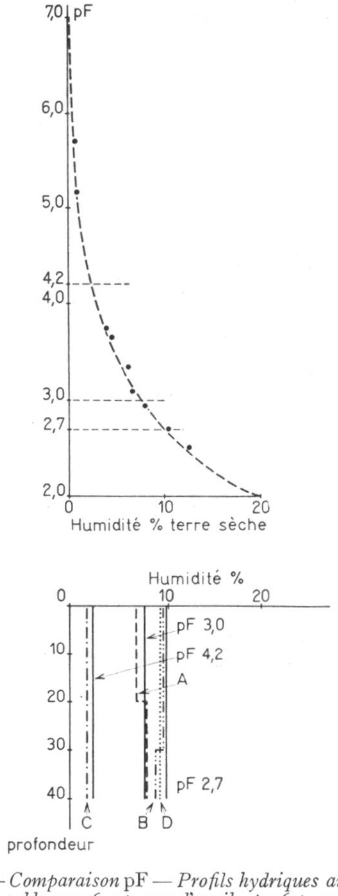


FIG. 6. — *Comparaison* pF — *Profils hydriques au champ.*
Terre n° 45 A profil de sable avec 6,3 p. 100 d'argile et 2,6 p. 100 de matière organique.

pF	Humidité p. 100
4,2	2,5 p. 100
3,0	8,0 p. 100
2,7	10,2 p. 100

A. — profil hydrique du 6 avril 1959 ;
B. — profil hydrique du 5 mai 1959 (ressuyé après une forte pluie) ;
C. — profil hydrique du 25 mai 1959 (culture de trèfle incarnat flétrie de façon permanente).
D. — profil hydrique du 23 novembre 1959, (ressuyé après pluie).

les réserves hydriques des sols, notamment le point de flétrissement permanent et la capacité de rétention. De plus, dans des buts de recherches, les courbes de pF peuvent être d'une grande utilité.

C'est pourquoi nous avons cherché à mettre au point une méthode relativement rapide, commode et reproductible de détermination des réserves hydriques des sols.

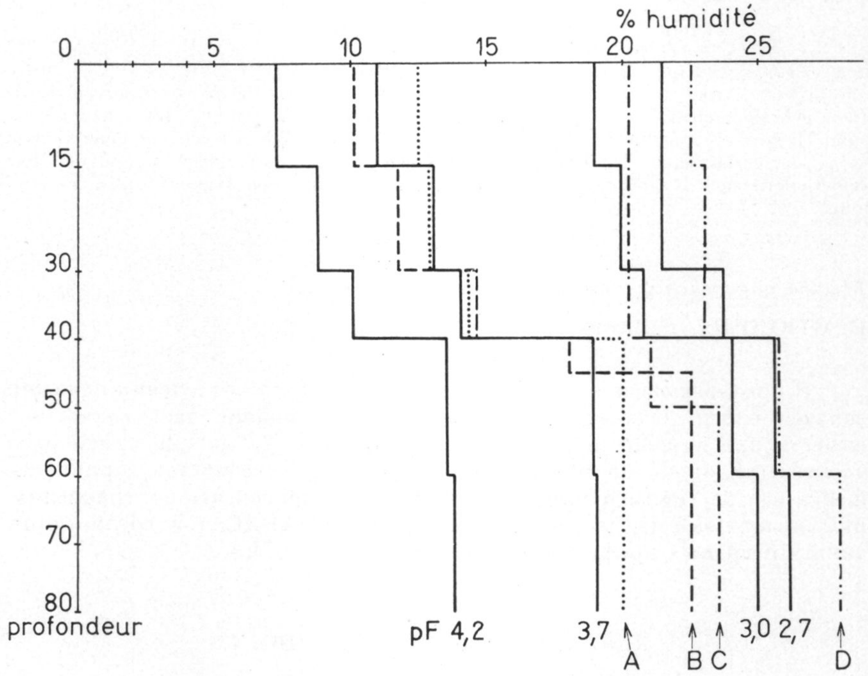


FIG. 7. — *Comparaison* pF — *Profils hydriques.*

ANALYSES

Profondeur	0 - 15	15 - 30	30 - 40	40 - 60
—	—	—	—	—
p. 100 argile	25,1	30,2	36,0	42,0
p. 100 limon	24,1	24,5	21,5	21,1
p. 100 matière organique	2,3	2,0	—	—

A. — desséchement maximum 1960 (juillet) ;
B. — désséchement maximum 1961 (septembre). Noter la réserve plus élevée qu'en 1960 (pluviomètre de 100 mm en juillet 1961).
C. — profil hydrique d'octobre 1960 (non entièrement réhumecté) ;
D. — profil hydrique de janvier 1961 (non entièrement ressuyé).

Avec un matériel de laboratoire courant, les méthodes par hygroscopicité et centrifugation nous ont permis d'élaborer des courbes de pF avec une précision suffisante.

Reçu pour publication en novembre 1961.

SUMMARY

A METHOD OF DETERMINING THE MOISTURE RESERVES OF SOIL.

A method of determining the moisture reserves of soil is described. Using conventional laboratory equipment, methods of centrifuging (between pF 2. 0 and 4,2) and determination of hygroscopicity (between pF 4,7 and 6,2) make the preparation of pF curves within a precision of 5 p. 100 possible. The results obtained were verified by comparison with other methods (RICHARD's method in particular) and agreed well with hydraulic profiles in the field.

ZUSAMMENFASSUNG

METHODE ZUR FESTSTELLUNG DER WASSERRESERVEN DER BODEN.

Vorliegende Arbeit beschreibt eine Methode zur Feststellung der Wasserreserven der Böden. Mit dem gebräuchlichen Laboratoriumsmaterial erlauben die Zentrifugal- (zwischen pF 2,0 und 4,2) und Hygroskopizitätsmethoden (zwischen pF 4,7 und 6,2) pF-Kurven mit einer Genauigkeit von 5 p. 100 auszuarbeiten. Die erhaltenen Ergebnisse wurden im Vergleich zu anderen Methoden (besonders derjenigen RICHARDS) geprüft und stimmen gut mit den Wasserprofilen in der Natur überein.

Метод определения почвенных запасов влаги.

Р. СТЮДЕР. — Шатору.

В предлагающейся работе описывается метод определения почвенных запасов влаги. Обычное лабораторное оборудование дает возможность вывести при помощи центрифугационного (pF от 2,0 до 4,2) о гигроскопического (pF от 4,7 до 6,2) методов кривые pF с точностью приближающейся к 5 %. Достигнутые результаты были проверены по сравнению с иными методами (в частности с методом РИЧАРДСА) и согласуются с данными водных профилей опытного поля.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

DEMOLON A., 1952. La dynamique du sol., 229-230

HALLAIRE M., 1953. Diffusion capillaire de l'eau dans le sol, Thèse Ing. Docteur I.N.R.A., 17.

SCHOFIEDLD R. K., 1955. Trans. 3rd internatl, Congr. Soil Sci., 11, 37-48.

Ann. agron., 1961, **12**, (6), 609-617.

547. 47 : 545

EMPLOI DES RÉSINES ANIONIQUES EN CHIMIE ANALYTIQUE AGRICOLE

Application au dosage du zinc

Rose MAZOYER
avec la collaboration technique de Sylvie Ple
Station d'Agronomie et de Physiologie végétale,
Centre de Recherches agronomiques de Provence, Antibes.

SOMMAIRE

L'emploi d'une résine anionique Dowex 1 × 8 permet une séparation sélective du zinc dans les extraits chlorhydriques des végétaux. Le zinc est ensuite dosé par le Zincon après son élution par une solution de NO_3Na 0,1 N.

Un protocole de dosage est donné. Ce protocole employé pour le dosage du zinc dans les feuilles de Jasmin a permis d'obtenir un coefficient de variation de 5,5 p. 100.

I. — INTRODUCTION

1° *Possibilités d'emploi des résines anioniques pour la séparation d'ions métalliques*

Le développement important qu'a pris en chimie analytique, l'emploi des résines synthétiques, a fait naître dans la littérature spécialisée un nombre considérable de publications relatives aux échanges ioniques. Mais si jusqu'à ces dernières années les échanges cationiques avaient la vedette, des travaux originaux et très complets de Krauss et de ses collaborateurs (1950-1955) sur les résines anioniques ont attiré l'attention sur les avantages considérables que les analystes peuvent tirer de ces résines. Dès 1955, Krauss pouvait affirmer : « l'échange des anions spécialement dans les complexes métalliques, présente un certain nombre de caractéristiques uniques et apparaît comme un instrument nouveau, puissant et souple susceptible de trouver rapidement des applications variées ». En effet un certain nombre d'ions métalliques forment apparemment des complexes dans des milieux définis comme l'acide

chlorhydrique, (TREMILLON, 1961). Ces complexes, en l'occurence les complexes chlorés métalliques, chargés négativement, se comportent comme des anions et, à ce titre, peuvent se fixer sur des résines échangeuses d'anions fortement basiques telles que la résine Dowex 1 ou l'Amberlite I. R. 400 (BROOKS, 1960). L'adsorption de ces complexes dépend du complexe métallique lui-même et de la molarité de l'acide chlorhydrique dans lequel il est formé. Les études de KRAUSS (Loc. cit.) montrent que pour obtenir une adsorption notable des complexes chlorés des ions bivalents, sur une résine anionique, la molarité de l'acide chlorhydrique doit croître quand on passe du zinc au manganèse selon l'ordre suivant : Zn > Cu > Co > Fe > Mn.

Il est à noter que le nickel et l'aluminium ne sont pas adsorbés même en milieu chlorhydrique concentré (12 M). La stabilité de ces mêmes complexes décroît dans l'ordre précité, donc une élution sélective des ions ainsi fixés sur la résine est possible, cette élution dépendant donc, elle aussi, du complexe et de la molarité de l'acide chlorhydrique ou de tout autre éluant tels que NaOH, ClNa, NO_3Na, etc.

Ces études théoriques ont conduit à l'élaboration de techniques nouvelles de séparation d'ions métalliques présents dans une même solution, et de ce fait, à des dosages plus précis des ions ainsi isolés. D'autre part, ces techniques présentent sur les techniques classiques de séparation par les solvants, de nets avantages du fait de leur simplicité et de leur précision.

Une des application intéressantes de séparation de cations sur résines anioniques est celle du dosage du zinc. A la suite des travaux de KRAUSS (loc. cit.) de nombreux chercheurs tels que JACKSON et BROWN (1956), YAN et FISKELL (1958), MILLER et HUNTER (1954), HUNTER et COLEMAN (1960), MAIER et BULLOCK (1958) ont étudié ce dosage. La séparation sélective de l'ion Zn dans le milieu à analyser a permis un dosage précis de cet élément par la méthode colorimétrique au Zincon.

2° *Dosage colorimétrique du zinc par le Zincon*

Le Zincon soit le 2 carboxy-2′ hydroxy-5′ -sulfoformazyl-benzène (Brevet CIBA, 1948) donne avec le zinc un complexe coloré qui suit la loi de BEER. La sensibilité de cette méthode, bien qu'inférieure de cinq fois environ selon RUSH et YOE (1952-1954) à celle à la dithizone est très suffisante, pour un dosage très correct du zinc dans les plantes et les extraits de sol.

En tenant compte de certains facteurs et tout particulièrement de celui du pH (point toujours critique dans toutes les méthodes colorimétriques) il nous est possible de doser avec une grande précision le zinc dans des solutions étalons. Mais le Zincon n'étant pas un réactif spécifique du zinc, la zone des interférences est très vaste comme nous avons pu le vérifier. Aussi une séparation rigoureuse de l'ion Zn dans les extraits à analyser s'imposait si l'on voulait doser cet élément par cette méthode colorimétrique. Si une séparation à la dithizone est capable de donner de bons résultats, cette dernière méthode est néanmoins longue, fastidieuse et présente des difficultés certaines. Aussi la séparation sur colonne de résine, séparation d'une grande facilité de manipulation, marque un très net progrès dans le dosage colorimétrique du zinc.

En tenant compte des travaux des divers auteurs déjà cités, nous avons expérimenté les différents protocoles proposés et nous avons particulièrement étudié la meilleure élution du zinc après fixation de cet élément sur la résine. Les différents

éluants expérimentés ont été : ClH 0,005 M, NaOH N et enfin une solution NO_3Na 0,1N (ULRICH et *al*, 1959). La méthode américaine d'élution par NO_3Na et celle par la soude nous ont donné de meilleurs résultats que l'élution à l'acide chlorhydrique très dilué. Mais nous avons adopté la méthode américaine pour deux raisons : le pH optimum est plus facile a atteindre après une élution par NO_3Na qu'après une élution par la soude N et d'autre part, les résines soumises au régime brutal ClH 2N-NaOH N s'abîment très rapidement alors qu'avec l'élution par NO_3Na il est possible de faire au moins une vingtaine de déterminations avec régénérations de la même résine sans altération sensible de cette dernière.

II. — PROTOCOLE DU DOSAGE DU ZINC DANS LES VÉGÉTAUX

1° *Minéralisation et réactifs utilisés.*

Nous avons adopté la minéralisation par calcination. L'étude de l'analyse des traces dans du matériel organique et biologique par GORSUCH (1959) (étude faite à l'aide d'éléments marqués) montre nettement que la calcination de tels produits n'entraîne pas de perte de zinc si la température de la calcination ne dépasse pas 500°C, même pour des échantillons pauvres en zinc. Pour cet auteur « seule la rétention du zinc sur la silice des capsules semble être un problème plus sérieux, bien que les pertes obtenues semblent négligeables à la température de calcination de 600°C ».

Le protocole est le suivant :

— Calciner, dans une capsule de platine de préférence, 1 ou 2 g de poudre végétale au four à moufle à 450-500°C (éviter une pré-calcination sur bec Bunsen car ce dernier est susceptible d'introduire du zinc).

— Laisser refroidir les cendres.

— Ajouter 5 cc ClH 2 M.

— Transvaser dans un tube conique à centrifuger, en lavant avec 15 cc ClH 2 M.

— Centrifuger (opération généralement inutile).

— Prélever une partie aliquote (selon la teneur présumée en zinc) de 2-5 ou 10 cc du liquide clair surnageant, que l'on fera passer directement sur la résine.

Notons qu'il ne convient pas d'insolubiliser la silice car cette opération, inutile dans ce dosage, risque d'entraîner des pertes de zinc.

On utilise les réactifs suivants :

1° Résine : Dowex 1,X. 8 de 50-100 mesh.

2° ClH analytique, de préférence Merck ou Flucka qui peut être encore purifié, si besoin est, par passage sur une colonne de résine Dowex 1 :

— ClH 6 M.

— ClH 2 M.

3° Chlorure de potassium R. P. (Solution normale).

4° Nitrate de sodium R. P. (Solution décinormale).

5° Solution tampon à pH 9,2.

Dans un ballon jaugé de 1 litre dissoudre 31 g d'acide borique Merck et 37 g de chlorure de potassium. Avant de compléter à 1 litre, rajuster le pH à 9,2 au pH mètre, soit par la soude soit par ClH dilués.

6° Réactif Zincon.

Dissoudre 50 mg de poudre dans 100 cc de la solution tampon. Cette solution n'est stable que 3 ou 4 jours.

2° *Élimination des ions interférants.*

A. *Préparation des résines.*

a) *Appareillage.*

On peut mettre en batterie sur un support métallique, 12 colonnes échangeuses d'ions. Ces colonnes sont faites à la Station à partir de tulipes auxquelles sont ajoutés des tubes coudés de 3mm de diamètre, selon le croquis (fig. 1). La hauteur de la partie coudée est calculée de manière que le sommet de la colonne de résine n'aille jamais totalement à sec, la hauteur de la colonne de résine étant fixée.

On introduit un peu de coton de verre au fond de la tige de la tulipe puis la résine préalablement gonflée 24 heures dans de l'eau déminéralisée. La hauteur de la résine doit être environ de 8 à 9 cm ce qui correspond à 1,5-2 g environ de résine sèche.

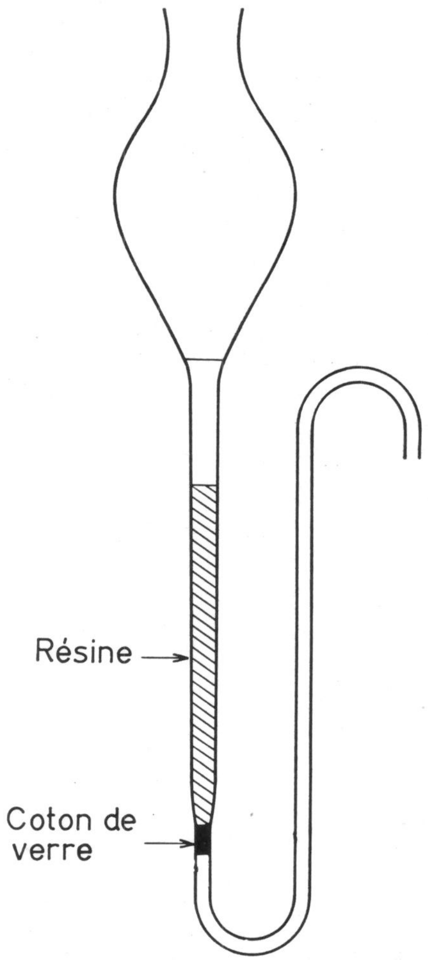


FIG. 1. — *Colonne d'échange.*

b) Purification des résines.

Faire passer sur chaque colonne :

— 25 cc ClH 12 M.
— 25 cc ClH 6 M.
— 25 cc ClH 2 M.
— 50 cc d'eau déminéralisée.

La résine est alors prête à l'emploi.

B. *Séparation du zinc et dosage.*

— Laver la résine avec 5 cc ClH 2 M.
— Passer l'extrait chlorhydrique 2 M des végétaux dosant de 0 à 40 γ de zinc.
— Laisser s'écouler toute la solution.
— Laver avec 2 cc ClH 2 M.

— Passer immédiatement après 20 cc ClK N pour éliminer les ions interférants, laver avec 2 cc supplémentaires.
— Éliminer cet éluant.
— Placer sous chaque colonne un ballon jaugé de précision de 50 cc.
— Passer 20 cc de NO_3Na 0,1 N, puis 2 cc pour laver la colonne.
— Les ballons sont mis de côté pour le dosage du zinc. Les résines sont régénérées en passant sur chaque colonne 35 cc ClH 2 M.

3° *Colorimétrie.*

— Ajouter dans le ballon jaugé 5 cc de la solution du colorant Zincon.
— Compléter à 50 cc par l'eau déminéralisée.
— Agiter vigoureusement.
— Colorimétrer au spectrophotomètre JEAN et CONSTANT à 6 200 Å avec les cuves de 3 cm.
— La coloration est stable 12 heures.
S'il y a décoloration rapide des essais c'est que la solution du réactif Zincon est abimée.
— Une gamme est faite dans des conditions identiques, gamme titrant **0 à** 50 γ Zn/50 cc.

III. — RÉSULTATS OBTENUS ET CRITIQUE DE LA MÉTHODE

Sur cette base établie après de nombreux essais, nous avons pu faire les expériences suivantes :

A. — *Séparation et dosage du zinc dans une solution synthétique en milieu chlorhydrique 2 M*

Cette solution A contenait dans 10 cc :
— 1 000 γ P (PO_4H_2K)
— 1 000 γ K (SO_4K_2)
— 1 000 γ Ca (SO_4Ca)
— 1 000 γ Mg (SO_4Mg)
— 1 000 γ Na (ClNa)
— 1 000 γ Fe (Sel de Mohr)
— 1 000 γ Mn (SO_4Mn)
— 1 000 γ Cu (SO_4Cu)
— 1 000 γ Co (SO_4Co)
— 500 γ Mo $(NH_4)_6MO_7O_{24}$ $4H_2O$)
— 20 γ Zn (SO_4Zn)

10 cc de cette solution ont été passés sur la résine et l'opération s'est poursuivie selon le protocole adopté. Pour s'assurer que dans l'éluant NO_3Na il n'y avait plus d'ions susceptibles d'interférer dans le dosage du zinc, nous avons dosé dans le premier percolat puis dans l'éluant KCl N les divers éléments introduits, c'est-à-dire :

1° P par la méthode au vanadate.

2° K, Ca, Na, par photométrie de flamme, en tenant compte des interférences.

3° Ca + Mg par la méthode au versenate avec nécessité de complexer les éléments mineurs.

4° Fe par la méthode au nitroso-R-salt.

5° Cu par la méthode à la bis-cyclohexanone.

6° Mn par la méthode d'oxydation au périodate de potassium.

7° Co par la méthode au nitroso-R-salt.

8° Mo par la méthode au thiocyanate d'ammonium.

Le résultat de ces analyses a confirmé les données théoriques, à savoir :

1° P, K, Ca, Mg, Na, ne forment pas de complexes chlorés et ne sont donc pas adsorbés par la résine. Nous les avons retrouvés en totalité dans le premier percolat après passage de la solution A sur la résine.

2° Cu, Co, Mn se retrouvent également en totalité dans le permier percolat après passage de la solution A sur la résine, ce qui confirme qu'à la molarité HCl 2 M choisie l'adsorption des complexes chlorés de Cu, Co, Mn, ne se fait pas, la molarité adoptée étant insuffisante.

3° Fe se retrouve en partie dans le premier percolat après passage de la solution A, le reste se dose dans l'éluant KCl N (2e percolat). Fe, en effet, n'est fixé que partiellement à la molarité 2 M. Mais cette partie fixée est totalement éluée par KCl N.

4° Quant au molybdène nous l'avons dosé également dans les 2 percolats, mais nous ne l'avons pas retrouvé intégralement ; aussi, l'avons nous dosé dans l'éluant NO_3Na où nous avons retrouvé la différence entre ce qui avait été introduit et ce qui avait été dosé dans le 1er percolat et dans l'éluant KCl. Donc, Mo n'est que partiellement fixé à la molarité KCl 2M comme le fer mais il n'est pas élué totalement par KCl N. Il faut toutefois signaler que le molybdène n'interfère pas dans le dosage du zinc par le Zincon, (500 γ n'amène aucune perturbation) donc sa présence dans l'éluant NO_3Na où est dosé le zinc n'est en rien compromettante. Cependant, des essais de fixation et d'élution de molybdène sur la résine Dowex 1 nous permettent de conclure qu'il est possible d'éluer totalement le molybdène fixé, si besoin est, en faisant passer sur la résine après la 1re percolation 25 cc d'HCl 0,5 M.

5° Zn se retrouve en totalité dans l'éluant NO_3Na 0,1 N, ce qui confirme que son complexe chloré est fortement et totalement retenu à la molarité 2 M et qu'il est intégralement élué par NO_3Na.

Notons que le plomb n'interférant pas avec le Zincon, nous n'en avions pas mis dans notre solution. Nous n'avions pas mis non plus d'aluminium, le dosage de cet élément se faisant encore difficilement. Mais selon les données théoriques il n'est pas fixé par la résine à HCl 2 M donc ne peut être gênant dans les dosages du zinc par cette méthode.

Ces essais nous permettent de conclure que le zinc est, par ce procédé, bien isolé des autres éléments les plus courants dans les extraits chlorhydriques des végétaux, et de ce fait, peut être dosé avec une bonne précision par le Zincon.

B. — *Essais de dosage dans les végétaux*

Le matériel choisi a été des feuilles de Jasmin. Nous avons fait 19 dosages séparés à partir de 19 prises d'essais différentes de la même poudre végétale. Les résultats consignés dans le tableau suivant nous ont permis de calculer le coefficient de variation CV p. 100 (tableau 1).

Le dosage du zinc dans les extraits végétaux, grâce aux séparations possibles sur résine Dowex 1, ne présente plus de difficultés sérieuses, bien que le coefficient de variation que nous avons obtenu puisse paraître encore élevé. Mais il apparaît qu'une autre méthode analytique du dosage du zinc, celle à la dithizone par exemple, que nous utilisions précédemment, ne peut donner des résultats aussi satisfaisants dans l'analyse en série. Il ne faut pas perdre de vue que le dosage colorimétrique au Zincon que nous avons adopté (le dosage par le versenate ne nous ayant pas donné satisfac-

tion) pose des difficultés qui, si elles sont inhérentes à toutes les méthodes de dosage de traces et donc des oligo-éléments dans les plantes, prennent ici une acuité plus nette encore. Ces difficultés sont dues pour une grande part aux risques de contamination. Du fait que les interférences sont nombreuses avec le réactif Zincon qui n'est pas un réactif spécifique du zinc, non seulement les oligo-éléments entraînent des perturbations (Cu, par exemple, donne un dosage apparent plus fort alors que le fer et le manganèse affaiblissent la coloration) mais encore le calcium, le potassium ou le magné-

TABLEAU I

Feuilles de Jasmin.

N°	Zn pour 1 g de poudre végétale	Écart par rapport à la moyenne	Carré des Écarts
1	23,8	— 1,2	1,44
2	26,3	+ 1,3	1,69
3	28,1	— 3,1	9,61
4	25,6	+ 0,6	0,36
5	23,8	— 1,2	1,44
6	25,6	+ 0,6	0,36
7	27,5	+ 2,5	6,25
8	24,4	— 0,6	0,36
9	25,0	0	0
10	24,4	— 0,6	0,36
11	23,8	— 1,2	1,44
12	25,6	+ 0,6	0,36
13	23,1	— 1,9	3,61
14	24,4	— 0,6	0,36
15	25,0	0	0
16	26,3	+ 1,3	1,69
17	23,1	— 1,9	3,61
18	24,4	— 0,6	0,36
19	25,6	+ 0,6	0,36
	$\Sigma = 475{,}8$ $\overline{X} = \frac{475{,}8}{19} = 25{,}0$		$\Sigma = 33{,}66$

$$\text{Variance : } \sigma^2 : \sigma^2 = \frac{33{,}66}{19 - 1} = 1{,}87$$

$$\text{Écart type } \sigma : \sigma = \sqrt{\sigma^2} = 1{,}37$$

Coefficient de variation CV %

$$\text{CV \%} \# \frac{1{,}37 \times 100}{25} \# 5{,}5.$$

sium influencent eux-mêmes cette coloration. Pour accroître la précision du dosage il est donc absolument nécessaire que dans la solution à doser il n'y ait d'autres cations que le zinc et éviter toute contamination dans cette solution. Il convient alors de se souvenir de tous les risques possibles de contamination dans un laboratoire. En premier lieu, il ne faut pas stocker les solutions à analyser surtout après leur passage sur résine. La verrerie, même parfaitement lavée aux acides et au versenate, a tendance à libérer certains ions. Nous avons stocké de telles solutions dans des ballons

jaugés pyrex de 50 cc le taux apparent de zinc dosé est passé de 5 à 12 γ pour certaines solutions, au bout de 20 jours. Un analyste signale avoir bouché des flacons d'agitation d'extraction acétique de sols avec des bouchons de caoutchouc et d'autres avec des capsules de polyéthylène. Le taux de zinc extrait est tombé de 15 p. p. m. (bouchons caoutchouc) à 5 p. p. m. (capsules de polyéthylène) ; les matières plastiques elles-mêmes ne sont pas sans danger ainsi que les graisses de robinet. Quant aux réactifs ils doivent être d'une grande pureté, et l'eau déminéralisée ne doit pas être inférieure en résistivité à 1 000 000 ohms/cm^2. Les papiers filtres dits sans cendres, sont eux-mêmes suspects. Aussi nous avons préféré la centrifugation à la filtration. Cette méthode évite les lavages sur filtre et nous permet également d'avoir des solutions plus concentrées si cela est nécessaire, Il convient de remarquer qu'une minéraralisation bien conduite où la matière organique est totalement éliminée, où les sels sont parfaitement redissous et où la silice n'est pas insolubilisée, donne des solutions limpides qu'il n'est ni besoin de filtrer ou de centrifuger et c'est dans ces cas que les résultats obtenus sont les meilleurs.

IV. — CONCLUSION

Une nouvelle méthode de séparation du zinc des autres éléments présents dans les extraits chlorhydriques des végétaux permet de doser avec une bonne précision cet élément par la méthode colorimétrique au Zincon.

Cette méthode facile, rapide et reproductible peut sans difficulté s'appliquer aux analyses en série. Le dosage du zinc dans les sols sera étudié sur ces mêmes bases, après percolation à l'acétate d'ammonium N.

Reçue pour publication Décembre 1961.

SUMMARY

THE USE OF ANION-EXCHANGE RESINS IN AGRICULTURAL-CHEMICAL ANALYSIS. ITS APPLICATION TO THE DETERMINATION OF ZINC

The anion-exchange resin Dowex 1 × 8 is suitable for the selective separation of zinc in hydrochloric extracts of plants. The zinc is subsequenth determined by means of Zincon after separation with a 0,1 n solution of $NaNO_3$.

The analytical procedure described fielded Zinc values, in the leaves of jasmine, with a coefficient of variation of 5, 5 p. 100.

ZUSAMMENFASSUNG

VERWENDUNG VON ANIONENHARZEN IN DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN ANALYTISCHEN CHEMIE. ANWENDUNG ZUR ZINKDOSIERUNG

Die Verwendung eines Anionenharzes Dowex 1 × 8 erlaubt die selektive Trennung dez Zinks in salzsauren Pflanzextrakten. Das Zink wird alsdann durch Zincon nach Elution einer NO_3 Na 0,1 N-Lösung dosiert.

Ein Dosierungsprotokoll wird angeführt. Dieses, für die Dosierung des Zinks in den Jasminblättern verwendet, erlaubt einen Variations-Koeffizienten von 5,5 p. 100 zu erhalten.

Применение анионных камедей в аналитической агро-химии. Их действие при дозаже цинка.

МАЗУАЙЕ — Антиб.

Применение анионной камеди называемой ДОВЕКС 1 × 8 позволяет селективное отделение Цинка в солянокислых экстрактах растений. Затем Цинк, после его элюции раствором нитрата натрия 0,1 N, определяется при помощи Цинкона.

Дается процедура этого анализа. Процедура эта при анализе Цинка листьев жасмина позволила получить коэффициент вариации в 5,5 %.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BROOKS R., 1960. The use of ion-exchange enrichment in the determination of trace elements in sea water. *Analyst*, **8** , 745-748.

CIBA. *Brevet Français*, 2 février 1948, 930, 684.

GORSUCH T. T., 1959. Radiochemical investigations on the recovery for analysis of trace elements in organic and biological materials. *Analyst*, **84**, 135-173.

HUNTER J. A., COLEMAN N. T., 1960. Ion-exchange separations in the determinations of some polyvalent. metal ions in plant tissue. *Soil Sci.*, **90**, 214. 218.

JACKSON R. K., BROWN J. G., 1956. The determination of zinc in plant material without the use of organic extractants. *Proc. Amer. Soc. Hort.*, **68**, 1-3.

KRAUSS K. A., MOORE G. E., 1953. Anion exchange studies. *J. Amer. Chem. Soc.*, **75**, 1460-1462.

KRAUSS K. A., et *al.*, 1954. Anions exchange studies : Absorbality of a number of metals in HCl solutions. *J. Phys. Chim.*, **58**, 11-17.

KRAUSS K. A., NELSON F., 1956. Anion exchange studies of the fission products. *Proc. Intern. Conf. Peaceful. Uses of Atomic Energy*, **7**, 113-131.

MAIER R. H., BULLOCK J. S., 1958. Determination of zinc in plant materials using ion-exchange chromatography. *Anal. Chim. Acta*, **19**, 354-359.

MILLER C., HUNTER J. A., 1954. Separation of zinc from certain other elements by means of anion exchange. *Analyst*, **79**, 483-492.

MOORE G. E., KRAUSS K. A., 1950. Adsorption of iron by anion exchange resins from hydrochloric acid solutions. *J. Amer. Chem. Soc.*, **72**, 5792-5793.

RUSH R. M., YOE J. H., 1952. A new colorimetric reagent for zinc. *Anal. Chim. Acta.*, **6**, 526-528.

RUSH R. M., YOE J. H., 1954. Colorimetric determination of zinc and copper with 2-carboxy-2 hydroxy -5 sulfoformazylbenzene. *Anal. Chim.*, **26**, 1345-1347.

TREMILLON B., 1961. Séparation d'éléments métalliques à l'aide de résines échangeurs d'anions. *Bull. Soc. Chim.*, 274-2894.

ULRICH A. et *al.*, 1959. *Calif. Agric. Exp. Stat. Bull.*, 766, 71-76.

YAM T. M., FISKELL J. A., 1958. Dithizone and Zincon procedures for zinc in plants separation of interfering elements by ion exchange resins. *J. A. O. A. C.*, **41**, 424-428.

Ann. agron. 1961, **12**, (6), 619-636.

545. 844

NOTIONS ÉLÉMENTAIRES DE CHROMATOGRAPHIE : PRINCIPES ET TECHNIQUES D'APPLICATION.

J. DECAU

Station d'Agronomie et d'Œnologie, Toulouse.

SOMMAIRE

Après avoir rappelé les grandes étapes de l'histoire de la chromatographie, l'auteur examine parallèlement, afin d'en souligner les analogies et les différences, les mécanismes de séparation des composants des mélanges par chromatographie de partage, par chromatographie d'adsorption et par chromatographie d'échange d'ions. Il envisage ensuite les principales modalités des diverses phases des analyses immédiates par chromatographie sur papier et par chromatographie sur colonne, puis l'application de ces techniques à l'analyse qualitative et quantitative des mélanges ; il essaie enfin de montrer, à l'aide de quelques exemples, le très vaste champ d'application de ces techniques récentes.

I. — INTRODUCTION : HISTORIQUE

La chromatographie occupe aujourd'hui une place très importante parmi les techniques de laboratoire et ses principes et applications sont familiers à de nombreux chercheurs. Cependant, il nous a paru utile de donner à ceux qui n'ont pas encore utilisé ces techniques un aperçu aussi simple et concis que possible de ces nouvelles méthodes d'analyse.

Le terme de chromatographie, formé à partir de deux racines grecques, signifie écriture ou inscription des couleurs ou matières colorantes. La première chromatographie fut ainsi une simple inscription de matières colorantes. Elle fut réalisée dès le début du siècle par TSWETT (1903), botaniste russe, qui, ayant extrait les pigments des feuilles, eut l'idée de passer une solution, dans l'éther de pétrole, de ces substances sur une colonne de carbonate de calcium. Il observa alors, dans la colonne, diverses bandes colorées (bande jaune due à la xanthophylle, zones vertes dues aux chlorophylles, etc.).

Mais ces travaux, publiés en langue russe, n'eurent guère de retentissement, de sorte qu'après cet éclair, la chromatographie sombre dans un sommeil qui va durer un quart de siècle. Elle en sortira seulement grâce aux travaux de KUHN et LEDERER (1931), qui redécouvrent les travaux de TSWETT et parviennent à séparer les caroténoïdes α et β sur alumine.

Mais, jusqu'en 1939, la chromatographie se limitera à des séparations de matières colorées : pigments d'origine animale ou végétale, ou colorants chimiques. Ces produits seront ainsi séparés

sur des colonnes contenant divers adsorbants : alumine, carbonate de calcium, chaux éteinte, oxyde de zinc, silice, etc.

Cependant, vers la fin de la seconde guerre mondiale, la chromatographie va prendre un essor considérable. On l'appliquera à une foule de substances incolores aussi bien que colorées, acides aminés, sucres, acides organiques, ions minéraux, etc. et ceci, d'une part parce que de nouveaux adsorbants de choix, les résines synthétiques à échange d'ions, d'emploi plus facile et plus général que les adsorbants classiques, sont venus agrandir le champ d'application de la chromatographie, d'autre part, parce que CONSDEN GORDON et MARTIN (1944) ont découvert une autre méthode de séparation des substances, basée sur un principe différent et qui emploie le papier filtre comme support.

La chromatographie dépassant alors largement les limites de son sens étymologique, il convenait de lui donner une définition plus générale.

II. — DÉFINITION GÉNÉRALE DE LA CHROMATOGRAPHIE

D'après T. I. WILLIAMS (1954) : « Par chromatographie, on entend *les processus qui permettent la séparation des mélanges* en réalisant la séparation de certains ou de tous leurs composants en zones concentrées sur ou dans des phases différentes de celles dans lesquelles ils étaient initialement présents, quelle que soit la nature de la force ou des forces qui font passer les substances d'une phase dans l'autre ».

On voit, d'après cette définition apparemment complexe, que les techniques chromatographiques sont des techniques d'analyse immédiate, c'est-à-dire des techniques qui permettent de séparer les composants des mélanges.

Il existe de nombreuses méthodes d'analyse immédiate : décantation, cristallisation fractionnée, distillation fractionnée, etc. Dans tous ces procédés, sont utilisées les différences qui existent entre certaines propriétés (le plus souvent physiques) des corps à isoler. Ainsi, le chloroforme et l'eau sont séparés par décantation parce que le chloroforme est plus lourd que l'eau ; l'azote et l'oxygène sont isolés à partir de l'air liquide par distillation fractionnée parce que l'azote bout à — 195°C tandis que l'oxygène bout à — 183°C, etc.

De même, la chromatographie, dans ces diverses modalités, utilise les différences existant entre 3 propriétés des corps.

— Dans la chromatographie de partage, c'est la différence de coefficient de partage des corps à séparer entre les deux phases liquides qui se forment quand on met en présence deux liquides non miscibles ou partiellement miscibles.

— Dans la chromatographie d'adsorption, c'est la différence d'affinité des corps pour la surface de composés adsorbants.

— Dans la chromatographie par échange d'ions, c'est enfin la différence d'affinité des substances ionisées pour les charges de l'adsorbant.

Un examen sommaire des mécanismes de séparation des composants des mélanges par ces trois types de chromatographie va montrer que, si les propriétés physiques mises en jeu y sont différentes, des analogies très grandes existent cependant entre ces divers types.

Examinons d'abord le cas de la chromatographie de partage.

III. — MÉCANISMES DE SÉPARATION DES COMPOSANTS D'UN MÉLANGE PAR CHROMATOGRAPHIE

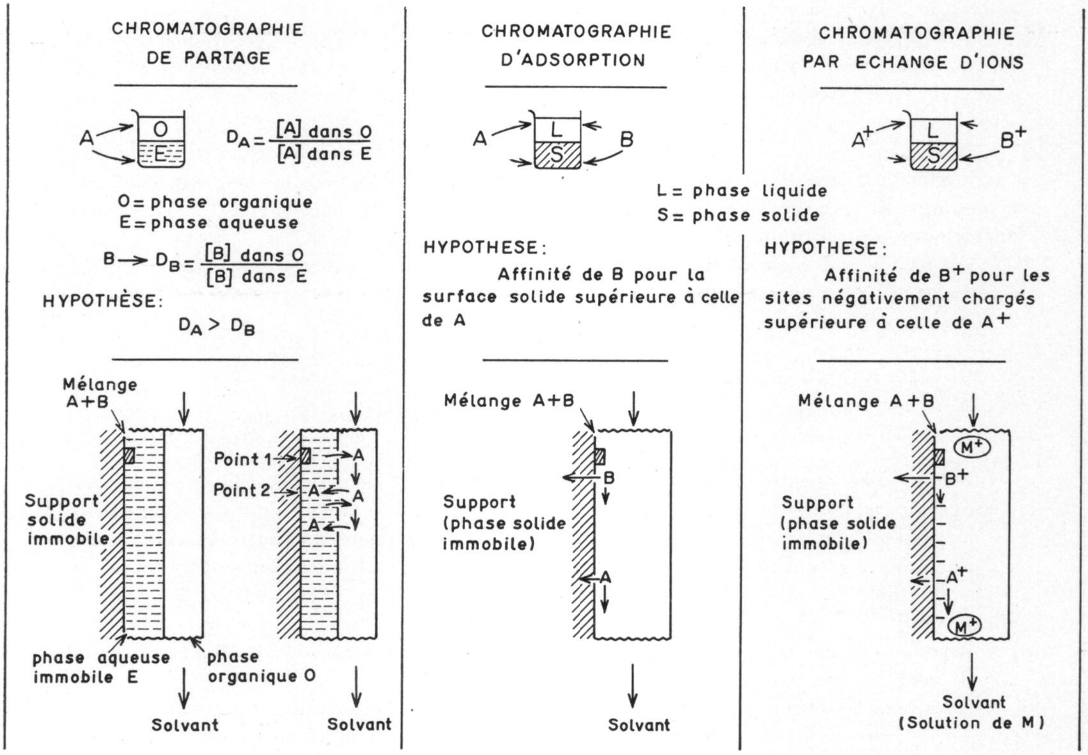
1° SÉPARATION PAR CHROMATOGRAPHIE DE PARTAGE

Les premiers essais de séparation des substances mettant en jeu leurs différences de coefficient de partage sont dus à MARTIN et SYNGE (1941). Ces auteurs ont essayé de fractionner un mélange

d'acides aminés acétylés en employant comme phases liquides le butanol normal et l'eau. Ils ont été conduits pour cela à réaliser un appareil compliqué, d'emploi extrêmement délicat.

Pour simplifier l'équipement et pour permettre la séparation des substances qui ont des coefficients de partage très voisins, ils décidèrent ensuite d'employer un support inerte dont le rôle serait seulement de retenir à sa surface la phase aqueuse contre laquelle s'écoulerait la phase organique mobile. De ces travaux est née la chromatographie de partage dont le principe est schématisé dans le tableau 1.

TABLEAU 1



Soit une substance A qui se dissout à la fois dans les phases (E) et (O) (aqueuse et organique, par exemple) de deux solvants non miscibles ou seulement partiellement miscibles. Il s'établit un équilibre entre la concentration de A dans la phase organique d'une part, et sa concentration dans la phase aqueuse d'autre part. Le rapport des deux concentrations est le coefficient de partage D_A de la substance A entre O et E.

$$D_A = \frac{(A) \text{ dans O}}{(A) \text{ dans E}}$$

Soit B une substance également soluble à la fois dans E et dans O et soit D_B son coefficient de partage entre les deux phases.

Prenons comme hypothèse $D_A > D_B$, c'est-à-dire

$$\frac{(A) \text{ dans O}}{(A) \text{ dans E}} > \frac{(B) \text{ dans O}}{(B) \text{ dans E}} \quad (1)$$

Appliquons un mélange A + B en un point déterminé (Point 1) du support choisi. Imprégnons ensuite celui-ci de phase aqueuse E, puis, faisons couler la phase organique le long du support. Si ce dernier a été convenablement choisi, la phase aqueuse, par exemple, fortement retenue par le support, demeure fixe tandis que la phase organique est seule mobile.

Dès que la phase O arrive au niveau de la tache, (Point 1), le composant A tend à se répartir entre les deux phases E et O suivant son coéfficient de partage entre ces deux phases. La phase organique, se déplaçant ensuite, se trouvera placée au contact d'une région de phase aqueuse qui ne contient pas la substance A (Point 2) ; A va donc repasser en partie dans la phase immobile.

Pendant ce temps, de nouveaux volumes de phase organique vont continuer à déplacer A à partir de la tache initiale pour la déposer un peu plus loin. De sa nouvelle position, la substance A se déplacera de nouveau de sorte qu'elle migrera ainsi le long du support.

B se déplacera également mais, comme il est plus soluble que A dans la phase aqueuse fixe, il faudra un plus grand volume de solvant organique pour obtenir une migration de B identique à celle de A ; donc, le déplacement de B sera plus court que celui de A quand le mélange sera soumis au passage du solvant.

Bref, chaque composant sera tiré dans le sens de déplacement de la phase organique et en même temps retenu par la phase aqueuse immobile. B, qui est le plus soluble dans la phase immobile, sera le plus fortement gêné dans son déplacement. A, qui est le plus soluble dans la phase mobile, pourra migrer beaucoup plus rapidement.

Cas limites : si B n'est soluble que dans la phase aqueuse, il ne se dissoudra pas dans le solvant d'entraînement et ne migrera pas ; si A est seulement soluble dans la phase organique, il se déplacera à la même vitesse que le solvant.

2° SÉPARATION PAR CHROMATOGRAPHIE D'ADSORPTION

Pour séparer les substances, en chromatographie de partage, sont simultanément nécessaires, d'une part un support solide, d'autre part deux solvants liquides non miscibles qui constituent de ce fait deux phases liquides dont l'une est immobilisée par le support tandis que l'autre demeure mobile.

En chromatographie d'adsorption, au lieu d'un partage des substances entre deux phases liquides, on établit un partage phase liquide - phase solide. Le solide est ici la phase fixe, le liquide, la phase mobile.

Reprenons encore les substances A et B envisagées ci-dessus et supposons que B ait une affinité pour le solide supérieure à celle de A.

Choisissons un solvant présentant une affinité pour la surface adsorbante. A la suspension support-solvant, c'est-à-dire au système phase solide - phase liquide, ajoutons une certaine quantité de substance A. Celle-ci va se répartir entre les deux phases et le rapport de ses concentrations dans les deux phases sera :

$$\frac{\text{(A) dans phase liquide}}{\text{(A) dans phase solide}}.$$

Ajoutons au système une quantité déterminée d'une substance B présentant une affinité pour le support plus grande que celle de A ; B se répartira cependant entre les deux phases suivant le rapport de concentration :

$$\frac{\text{(B) dans phase liquide}}{\text{(B) dans phase solide}}.$$

De l'hypothèse : affinité de B > affinité de A, résultera généralement l'inégalité :

$$\frac{\text{(A) dans phase liquide}}{\text{(A) dans phase solide}} > \frac{\text{(B) dans phase liquide}}{\text{(B) dans phase solide}} \quad (2) \text{ à rapprocher de } (1).$$

L'inégalité (2) ne sera cependant vérifiée pour toutes les concentrations de A et de B que si les isothermes d'adsorption de A et de B sur le support sont linéaires. Cette condition peut être réalisée grâce à un choix convenable du solvant (CHOVIN, 1959).

Lorsque le mélange A + B sera placé en un point du support solide et que l'on fera passer contre celui-ci un courant de solvant, les substances A et B, comme en chromatographie de partarge, migreront à des vitesses différentes, puisqu'elles se répartissent ici encore différemment entre les deux phases, et ainsi se sépareront.

3° SÉPARATION PAR CHROMATOGRAPHIE PAR ÉCHANGE IONIQUE

En chromatographie par échange d'ions, le même mécanisme de séparation pourra être mis en œuvre. Les composants du mélange, A^+et B^+, par exemple, ionisés dans les conditions de milieu réalisées, doivent présenter pour les groupes fonctionnels du support, eux-mêmes ionisés mais de signe contraire, des affinités différentes. Quand le solvant se déplacera contre la phase solide fixe, A^+ et B^+ seront soumis, comme dans les cas précédents, à des forces opposées, forces dites de contrainte dues à l'action du courant liquide, forces de résistance dues à leur liaison ionique avec le support échangeur d'ions, et ainsi séparés.

De la comparaison des mécanismes des différents types de chromatographie, il ressort que ceux-ci ont au moins en commun l'emploi d'un support solide fixe et d'une phase liquide mobile, le solvant.

Il convient de donner quelques précisions quant à la nature de ces matériaux fondamentaux de la chromatographie que sont les supports et les solvants.

IV. — TECHNIQUES DE SÉPARATION DES CORPS PAR CHROMATOGRAPHIE

1° MATÉRIAUX FONDAMENTAUX DE LA CHROMATOGRAPHIE

a) *Supports*

Dans le tableau 2, les principaux supports ont été rangés de gauche à droite par ordre d'efficacité croissante dans la rétention des substances, depuis le papier filtre, la cellulose, le gel de silice et l'amidon qui sont considérés, en première approximation, comme inertes dans la séparation chromatographique proprement dite et servent donc pour réaliser des chromatographies de partage, jusqu'aux échangeur d'ions qui mettent en jeu les forces de résistance les plus grandes.

TABLEAU 2

Principaux supports employés en chromatographie

Papier filtre	Cellulose	Alumine	Silicates naturels ou synthétiques
	Silice	Autres oxydes (Ca, Mg, Pb, Zn)	Permutites
	Amidon	Carbonates (de Ca, Ba, Mg, Zn, Na)	Lignites sulfonés
	Saccharose	Sulfates (de Ca, Ba, Cu, Zn, Mn, Al, Mg)	Cellulose activée
	Diméthylglyoxime	Charbon	Papier filtre activé
			Résines synthétiques

On ne peut cependant distinguer dans tous les cas de façon rigoureuse les supports utilisés en chromatographie de partage de ceux employés en chromatographie d'adsorption ou en chromatographie avec échange d'ions. Un même support, en effet, servira, suivant les traitements qu'il a subis et suivant le solvant auquel il est associé, en chromatographie d'adsorption ou en chromatographie de partage par exemple. De plus, au cours de la séparation des composants d'un mélange, ceux-ci, sur un support donné, sont souvent retenus simultanément par plusieurs types de forces. Ainsi, les

acides aminés, qui sont séparés par chromatographie de partage sur papier, s'ils sont retenus essentiellement par la phase aqueuse fixée par le papier, le sont aussi par adsorption et par échange ionique sur ce support.

b) *Solvants*

Les techniques chromatographiques font appel à un nombre très élevé de solvants.

Dans la chromatographie de partage, ceux-ci doivent constituer des systèmes de deux phases. La nature chimique des corps à séparer indique habituellement la classe des solvants à employer. Ainsi, pour séparer des substances solubles dans l'eau mais peu solubles dans les solvants organiques apolaires, on fait appel au mélange d'un solvant organique qui ne dissout que faiblement les substances à séparer et d'un second solvant non miscible ou seulement partiellement miscible qui pourra être l'eau ou un autre solvant polaire ; la phase aqueuse est la phase fixe, la phase organique la phase mobile. Lorsqu'on séparera, par exemple, les acides aminés par chromatographie sur papier grâce au phénol saturé d'eau, l'eau sera la phase fixe, le phénol, la phase mobile.

L'une des deux phases peut aussi être formée par un mélange de solvants. Un exemple en est fourni par la séparation des acides organiques sur gel de silice d'après la méthode de BOVÉ et RAVEUX (1957) : contre la phase aqueuse retenue par la silice, ces auteurs font successivement couler plusieurs mélanges chloroforme-butanol tertiaire de polarité croissante.

En chromatographie d'adsorption, on peut de même faire appel à des solvants liquides purs, à des mélanges de liquides miscibles, mais aussi à des solutions.

Parmi les liquides purs les plus couramment employés, citons le cyclohexane, le toluène, le benzène, l'éther, l'acétone, l'éthanol. Ces solvants présentent des affinités différentes pour les supports ils ont été classés, de ce fait, par différents auteurs, d'après cette propriété, en séries éluotropiques. D'après JACQUES et MATHIEU (1946), l'affinité pour les supports serait proportionnelle à la constante diélectrique.

Mais, le plus souvent, les solvants sont employés en mélange. Il est possible, alors, de faire varier à volonté les rapports des divers composants du mélange et donc l'efficacité de celui-ci pour faire migrer les substances.

La phase liquide peut aussi être formée d'un liquide sans affinité pour la surface adsorbante mais renfermant en solution une substance qui s'adsorbe aisément sur celle-ci et peut ainsi déplacer les composants à isoler.

Ceci devient le cas général en chromatographie d'échange d'ions : la phase liquide doit contenir des substances ionisées dissoutes susceptibles de déplacer les substances à séparer. Voici deux exemples : les acides aminés fixés sur résine cationique peuvent être séparés grâce à différentes solutions aqueuses de sels de sodium ; de même, les acides organiques retenus par une résine anionique pourront être différenciellement déplacés par des solutions d'acide formique ; l'ion sodium dans le premier cas, l'ion formiate dans le second, entrent en compétition avec les substances à séparer pour neutraliser les charges des supports.

Jusqu'ici, la chromatographie a été envisagée d'un point de vue théorique et l'on a distingué essentiellement les différents systèmes support-solvant d'après la nature des forces mises en jeu quand un mélange de substances à isoler y est ajouté.

Il convient d'envisager aussi le problème sous un angle pratique. On est dans ce cas immédiatement conduit à examiner l'état physique sous lequel se présentent les supports chromatographiques.

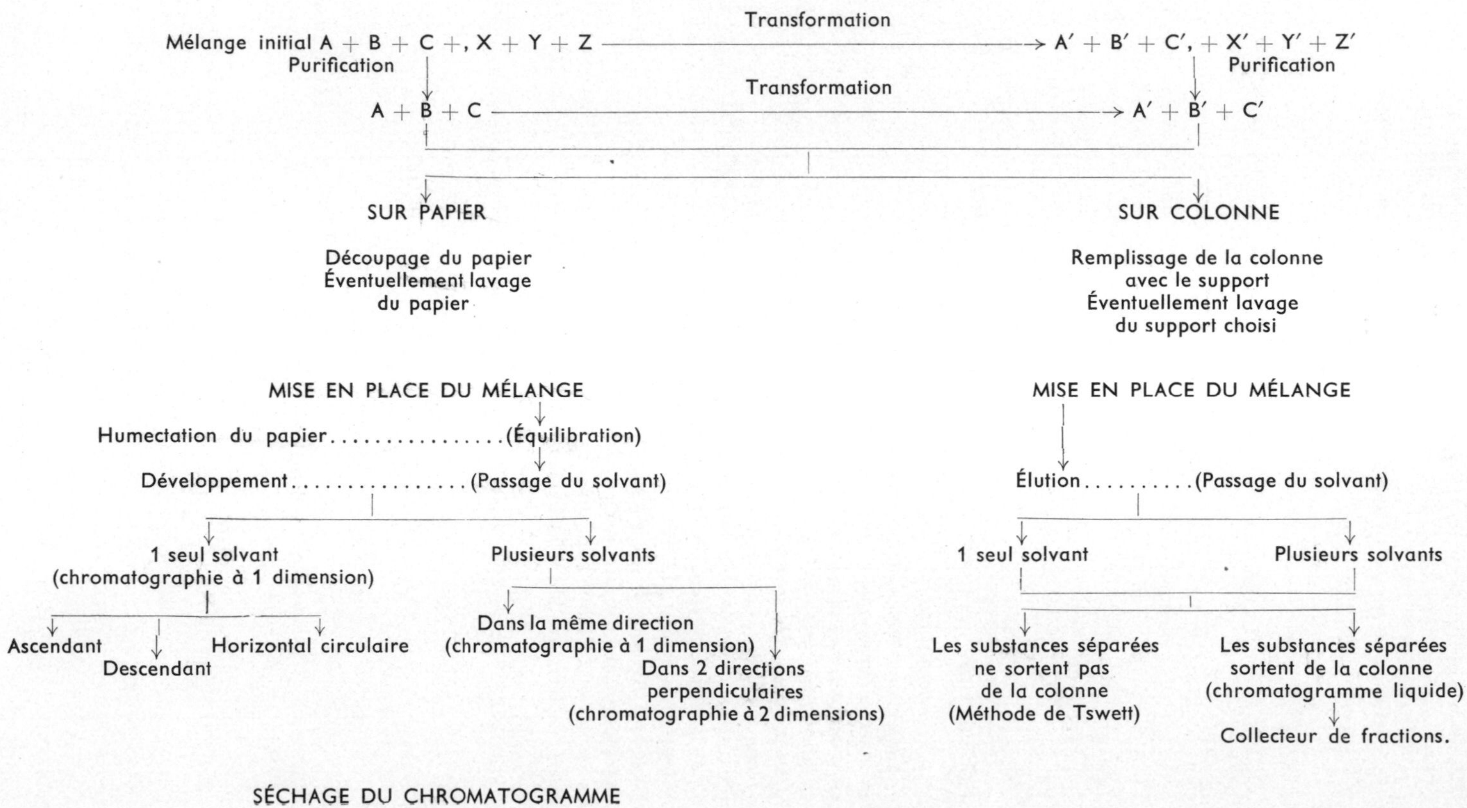
Après un examen sommaire du tableau 2, on voit que ceux-ci se présentent tous habituellement sous forme de poudres, de grains plus ou moins fins, à l'exception des papiers à chromatographie qui se présentent sous forme de feuilles.

Pour effectuer les séparations chromatographiques, les poudres doivent être placées dans des colonnes tandis que le papier filtre est employé en feuilles.

Les techniques de séparation sur colonne différant de celles sur papier, il faut donc envisager séparément les étapes pratiques de la chromatographie sur papier d'une part, de la chromatographie sur colonne d'autre part.

TABLEAU 3

Principales étapes des séparations par chromatographie



2° PRINCIPALES ÉTAPES DES SÉPARATIONS PAR CHROMATOGRAPHIE

Celles-ci sont mentionnées dans le tableau 3, dans lequel figurent aussi les traitements que doivent généralement subir les mélanges avant séparation par chromatographie.

Examinons d'abord ces opérations préalables.

a) *Traitements préliminaires des mélanges à séparer*

a) *Purifications.*

Soient A. B, C, les composants d'un mélange. Dans le cas général, celui-ci contient des impuretés désignées ici par X, Y, Z. Il sera le plus souvent nécessaire d'éliminer ces impuretés avant d'entreprendre la séparation des composants A, B et C.

On aura, par exemple, à fractionner un mélange d'acides aminés obtenus par hydrolyse d'un tissu végétal ou encore un mélange d'acides organiques extraits du sol. Dans chaque cas, les composés organiques sont accompagnés d'impuretés, d'ions minéraux en particulier, qui vont gêner la séparation des composés organiques. Il y a donc lieu d'éliminer ces matières minérales avant la chromatographie, ce qu'on réalise en employant soit des déminéralisateurs électrolytiques, soit des résines à échange d'ions.

Il n'est cependant pas possible de donner ici de méthode générale de purification, les techniques variant suivant les séparations chromatographiques à réaliser.

b) *Transformations.*

Après élimination des impuretés, le mélange A + B + C peut être immédiatement fractionné. Mais il arrive parfois que les substances A, B, C ne se séparent pas très bien par chromatographie. C'est le cas, par exemple, des acides formique et acétique qui, avec la plupart des solvants, demeurent superposés.

Dans d'autres cas, les substances A, B, C, trop fragiles, risquent de s'altérer au cours de la chromatographie. C'est le cas des acides α cétoniques ; la présence d'une fonction cétone dans la molécule, sur le carbone voisin de celui portant la fonction acide, rend ces corps si instables qu'il n'est pas possible de les séparer directement par chromatographie.

Dans ces différents cas, il est préférable de transformer les composés à analyser. On transforme par exemple (tableau 4) les acides formique et acétique en les acides hydroxamiques correspondants, plus aisément séparables, les acides α cétoniques en leurs dinitrophénylhydrazones beaucoup plus stables que les composés initiaux ; on peut de même transformer les acides aminés, pour la plupart incolores, en dinitrophénylaminoacides visibles en lumière ultra-violette.

TABLEAU 4

Transformation des composants à séparer : exemples

$$(A, B, C \longrightarrow A', B', C')$$

1) $$R-COOH \xrightarrow{+\ R'-OH} R-COOR' \xrightarrow{+\ NH_2OH} R-C(OH)=N-OH$$

Acide organique — Alcool — ester — hydroxylamine — acide hydroxamique

(R = H : acide formique)
(R = CH_3 : acide acétique)

2) $$R-CO-COOH \xrightarrow{+\ (NO_2)_2C_6H_3-NH-NH_2} (NO_2)_2C_6H_3-NH-N=C(R)-COOH$$

Acide α cétonique — dinitrophénylhydrazine — dinitrophénylhydrazone

3) $$R-CH(NH_2)-COOH \xrightarrow{(NO_2)_2C_6H_3F} (NO_2)_2C_6H_3-NH-CH(R)-COOH$$

Acide aminé — fluorodinitrobenzène — dinitrophénylaminoacide

On réalise ensuite la séparation des dérivés A′, B′, C′ obtenus ; on peut, dans certains cas, revenir après séparation, aux composés initiaux, par une simple hydrolyse.

Ces transformations élargissent le domaine d'application de la chromatographie et augmentent considérablement la variété des techniques.

b) *Séparation proprement dite*

Le mélange après purification ou transformation pourra être fractionné, suivant le cas, soit par chromatographie sur papier, soit par chromatographie sur colonne.

Le fractionnement par chromatographie sur papier sera envisagé tout d'abord.

a) *Chromatographie sur papier*

Découpage du papier

Cette technique utilise du papier à chromatographie, qui est un papier filtre de grain et d'épaisseur homogènes et bien déterminés. La feuille de papier est découpée à la dimension voulue ; la position des lignes de pliage possible et l'endroit où doit être placé le mélange à analyser sont marqués au crayon.

Mise en place du mélange

On doit ensuite déposer une goutte d'une solution du mélange à l'endroit marqué. Les substances que l'on désire séparer doivent réaliser une course le long du papier ; cette course, cette migration des substances, ne pourra être jugée avec précision que si celles-ci prennent le départ sur la même ligne, ce qui veut dire que la solution apportée devra s'étaler le moins possible sur le papier.

On devra pour cela appliquer des volumes de solutions très petits, de l'ordre de 5 μl, et, si l'on veut apporter des volumes plus importants, on sera conduit à fractionner les apports, en séchant chaque fois les petites fractions apportées, au moyen d'un séchoir à cheveux par exemple.

Ces faibles volumes seront prélevés et déposés au moyen de micropipettes qui sont de simples tubes capillaires gradués.

Humectation du papier

Une fois la tache faite, il faut réaliser la mise en place de la phase aqueuse immobile qui vient se fixer sur le papier. Cette opération sera facile puisque le papier filtre a une grande affinité pour l'eau. On peut pour cela exposer le papier à chromatographie pendant 10 à 15 mn dans un courant de vapeur d'eau ; on peut aussi placer le papier dans une enceinte fermée, saturée de vapeur de la phase aqueuse du solvant.

L'enceinte fermée utilisée est appelée cuve à chromatographie. Il existe des cuves à chromatographie de formes et de dimensions variées ; les cuves peuvent être construites en différents matériaux, bois, matières plastiques, verre, ce dernier matériau étant généralement le plus satisfaisant.

Développement

Après un temps suffisant d'équilibration ou d'humectation, on fait passer la phase organique le long du papier. Cette opération s'appelle le développement.

Le développement doit être réalisé à température constante, le partage des substances entre les deux solvants variant avec la température.

Dans le tableau 3 sont indiquées les diverses modalités du développement. On peut se contenter de faire passer un seul solvant le long de la feuille : on réalise ainsi un développement ou un chromatogramme à une dimension. Le développement à une dimension peut être ascendant, descendant ou horizontal. Le développement ascendant est généralement le plus facile à réaliser : c'est celui qui nécessite le matériel le plus simple. Il suffit, par exemple, de prendre une feuille de papier rectangulaire

et après avoir fait une série de taches près d'un côté du rectangle, de réunir les deux côtés qui lui sont adjacents au moyen de pinces pour former un cylindre. On plonge la base du cylindre près de laquelle se trouvent les taches des solutions à analyser dans un récipient (boîte de Pétri) ou dans le fond d'une cuve contenant le solvant. Une fois l'ensemble enfermé dans une cuve, le solvant va monter par capillarité. L'ascension n'est pas diminuée par une évaporation du solvant à partir des surfaces déjà humectées puisque cette opération a lieu dans une cuve fermée saturée de vapeurs de solvant. On ne peut cependant espérer, en chromatographie ascendante, une ascension de liquide supérieure à 25 cm, car le solvant doit lutter contre la pesanteur pour monter.

Au contraire, en chromatographie descendante, capillarité et pesanteur agissent dans le même sens et le parcours du solvant peur être beaucoup plus long. Pour réaliser un développement descendant, on replie l'extrémité de la feuille à chromatographie près de la tache de départ et on la plonge dans une augette fixée en haut de la cuve à chromatographie. L'augette est remplie de solvant et celui-ci descend le long du papier.

On peut aussi réaliser un développement horizontal. Il est possible, en effet, de placer une bande ou une feuille de papier horizontalement et de laisser le papier s'imbiber à partir d'un de ses côtés trempant dans une augette. Mais ceci ne présentant pas d'avantage particulier, n'est guère utilisé sous cette forme.

Par contre, il est parfois utile de réaliser un développement horizontal circulaire. Le papier à chromatographie, découpé en forme de cercle ou de carré, est ici encore placé horizontalement, mais on a pris soin de placer le mélange à séparer au centre du cercle ou au point d'intersection des diagonales du carré et l'on fait arriver le solvant en ce point, en découpant jusqu'au centre du chromatogramme une bandelette de papier qui plongera dans le solvant et jouera le rôle de mèche. Le solvant ainsi aspiré progressera dans le papier en formant un cercle qui s'agrandira peu à peu. On réalisera donc ainsi une chromatographie circulaire. Celle-ci a pour principal avantage sa simplicité technique et aussi sa rapidité.

Le passage d'un solvant migrant dans une direction donnée est suffisant pour séparer les composants de mélanges simples ; par exemple, avec trois acides aminés au départ, il est aisé d'obtenir, si leurs vitesses de migration sont très différentes, trois taches ou trois zones très nettement distinctes.

Mais, quand les mélanges sont complexes, le passage d'un seul solvant ne suffit pas pour séparer tous les composants : plusieurs substances présentent des migrations identiques dans le même solvant. Il y a donc lieu, pour séparer les substances qui demeurent superposées après le passage d'un solvant, d'en faire passer un second qui isolera les substances jusque-là superposées.

Après élimination du premier solvant par séchage, on peut faire circuler le second dans la même direction que le premier ou bien dans une direction perpendiculaire à celle du premier. On réalise, dans ce dernier cas, une chromatographie à deux dimensions.

Séchage des chromatogrammes

Les développements sont arrêtés généralement quand les solvants atteignent les bords des feuilles à chromatographie employées. Les composants du mélange se sont alors répartis suivant une ligne en chromatographie ascendante ou descendante à une dimension, suivant un plan dans le cas de la chromatographie circulaire et de la chromatographie à deux dimensions ; le développement est terminé ; on retire de la cuve les feuilles imbibées de solvant et on les fait sécher ; ces feuilles sont maintenant des chromatogrammes.

Les techniques qui viennent d'être décrites sont simples ; elles n'exigent pas beaucoup de temps de manipulation, mais ce sont des micro-méthodes : les quantités de substances séparées sont très faibles, de l'ordre de quelques γ. D'autre part, à la fin de la manipulation, les substances demeurent au contact du papier : il faut donc effectuer une opération supplémentaire pour les isoler et, de plus, les quantités que l'on peut isoler sont très faibles.

Devant ces inconvénients, on peut être tenté de fractionner le mélange par chromatographie sur colonne.

b) *Chromatographie sur colonne*

La colonne à chromatographie

Il a été signalé plus haut qu'en dehors du papier tous les supports se présentent sous forme de grains et qu'ils doivent être utilisés dans des colonnes. Ces colonnes sont de simples tubes présentant à leur base une plaque de verre fritté ou bien une plaque de verre perforée amovible, puis un rétrécissement qui est muni ou non d'un robinet. S'il n'y a pas de robinet, la base de la colonne doit être reliée à un tube de verre de faible section qui forme la deuxième branche d'un tube en U ; le solvant se trouve ainsi maintenu dans la colonne en permanence à un certain niveau ce qui évite la dessiccation des supports employés.

Remplissage de la colonne

Dans la colonne à chromatographie est placé un solide qui peut être soit un support inerte, retenant seulement une phase aqueuse immobile, soit un solide doué de propriétés adsorbantes, ou encore un échangeur d'ions.

Il existe différents procédés pour introduire le support dans la colonne; ceux-ci ne seront pas décrits ici. Il convient seulement de noter que le remplissage de la colonne est une opération très délicate qui conditionne dans une large mesure le succès ou l'échec des séparations.

Lavage du support

Il est souvent nécessaire ensuite de laver le support. Les lavages préliminaires ont pour but l'élimination d'impuretés qui gêneraient les séparations. Ces lavages différant suivant les séparations à réaliser ne pourront donc être envisagés.

Mise en place du mélange

Une fois le remplissage et, si nécessaire, les lavages terminés, la colonne est prête à recevoir le mélange à séparer. Comme dans les séparations par chromatographie sur papier, les substances à séparer devront être placées, autant que possible, au même point de départ. Il faudra donc les apporter sous un faible volume de manière qu'elles n'occupent au départ qu'un faible volume de la colonne.

On pourra dissoudre le mélange à analyser dans une quantité aussi petite que possible du solvant que l'on doit faire passer à travers la colonne et placer ensuite la solution obtenue en haut de la colonne.

On pourra également fixer le mélange à séparer sur une petite fraction du support et faire ensuite passer quantitativement celle-ci en haut de la colonne.

Développement ou élution

Le mélange étant mis en place, on fera couler à travers la colonne le solvant qui doit entraîner à des vitesses différentes les divers composants A, B, C ou bien A′ ,B′, C′. Cette opération est l'homologue du développement en chromatographie sur papier. En chromatographie sur colonne, elle est désignée sous le terme d'élution, terme admis par l'Académie des Sciences pour désigner l'action de retirer une substance adsorbée sur un support à l'aide d'un liquide auxiliaire.

Deux cas sont possibles :

— Ou bien, comme en chromatographie sur papier, on arrête l'élution quand le courant de solvant atteint le bas de la colonne ou, en tout cas avant que les substances à séparer en soient sorties

— Ou bien, au contraire, on pousse plus loin le passage du solvant et l'on recueille les substances une à une à leur sortie de la colonne.

Le premier procédé fut imaginé dès 1903 par TSWETT. Il conduit à des manipulations délicates : si l'on veut, notamment, recueillir les corps isolés par le passage du solvant, il faut en effet faire sortir le support encore humide de la colonne pour qu'il en conserve la forme ; il faut ensuite séparer, dans cette colonne de support, les zones contenant chacune un seul composant.

On peut éviter ces difficultés techniques en faisant sortir les différents composants de la colonne en poussant plus loin le déplacement de chacun. On obtient ansi un « chromatogramme liquide ». Les substances dissoutes dans le solvant sortent alors une à une ; pour les obtenir isolées, il faut recueillir les fractions successives du solvant, c'est-à-dire de l'éluat, à sa sortie de la colonne. Pour cela, on utilise un collecteur de fractions. Grâce à cet appareil, l'éluat est fractionné et chaque composant du mélange peut ainsi se trouver isolé dans un nombre plus ou moins faible de fractions.

L'élution, comme le développement en chromatographie sur papier, peut être réalisée avec un seul solvant, mais elle exige le plus souvent l'intervention de plusieurs solvants.

Quelques-unes des modalités possibles de l'élution sont indiquées dans le tableau 5.

A partir d'un mélange d'acides aminés placé sur une colonne de résine échangeuse d'anions, HIRS, MOORE et STEIN (1954) ont isolé et séparé l'acide aspartique et l'acide glutamique des autres acides animés grâce à un seul solvant : l'acide acétique 0,5 N.

Par contre, pour séparer 18 acides aminés au moyen d'une résine Dowex 50, STEIN et MOORE (1948) ont employé successivement trois solvants : l'acide chlorhydrique 1,5 N, l'acide chlorhydrique 2,5 N, puis l'acide chlorhydrique 4 N.

De plus, pour isoler les substances qui ont tendance à traîner dans les colonnes, il est souvent utile de changer progressivement la composition du solvant au cours de l'élution.

Enfin, il est possible également de réaliser l'élution à différentes températures en utilisant des colonnes thermostatées grâce à des chemises d'eau.

Ces deux dernières conditions sont réunies dans le troisième diagramme du tableau 5.

V. — APPLICATIONS DE LA CHROMATOGRAPHIE

Chromatographie sur papier et chromatographie sur colonne permettent la séparation des constituants des mélanges. Cette séparation peut être réalisée dans différents buts.

1° PRÉPARATIONS, ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS DES CORPS

Si les substances et leur comportement en chromatographie sont connus, la chromatographie peut être employée uniquement pour séparer ces substances. Les techniques décrites ci-dessus pourront, par exemple, être employées pour purifier une substance, pour la séparer de ses impuretés. Les séparations ou préparations peuvent se faire à l'échelle industrielle, mais en chromatographie sur colonne seulement. Il suffit de multiplier convenablement les dimensions des colonnes et de leurs accessoires.

On peut aussi réaliser la chromatographie de certains composés à des fins de recherche, par exemple pour étudier leurs affinités pour divers adsorbants, leurs isothermes, leur cinétique d'adsorption, etc.

Mais, généralement, la chromatographie est employée dans le but de déterminer la composition qualitative et quantitative des mélanges.

Examinons d'abord l'analyse qualitative dans le cas de la chromatographie sur papier.

2° ANALYSE DES MÉLANGES PAR CHROMATOGRAPHIE SUR PAPIER

a) *Analyse qualitative*

Repérage des substances sur le chromatogramme

Après une chromatographie sur papier, le premier problème qui se pose est le repérage des substances ; pour cette opération, certaines propriétés des substances isolées sont utilisées.

TABLEAU 5

Conditions d'élution : exemples

1° Séparation des acides aspartique et glutamique sur colonne Dowex 1 × 8 à 25°C (C. H. W. HIRS, S. MOORE and W. H. STEIN, 1954)

Début de l'élution	Volume de solvant (cc): 0 → 100 Fin de l'élution
Nature du solvant	Acide acétique 0,5 N
Position de sortie des acides aminés	Acides aminés neutres et basiques; Acide glutamique; Acide aspartique

2° Séparation de 18 acides aminés sur résine Dowex 50 × 8 à 25°C (W. H. STEIN and S. MOORE, 1949)

Début de l'élution	Volume de solvant (cc): 0 — 75 — 325 — 600 Fin de l'élution
Nature du solvant	HCl 1,5 N (0–75); HCl 2,5 N (75–325); HCl 4 N (325–600)
Position de sortie de quelques acides aminés	Acide aspartique; Leucine; Lysine; Arginine; Phénylalanine

3° Séparation des acides aminés neutres et basiques sur résine Dowex 50 × 4 (C. H. W. HIRS, S. MOORE et W. H. STEIN, 1954)

Début de l'élution	Volume de solvant (cc): 0 — 280 — 800 Fin de l'élution
Nature du solvant	HCl N (0–280); HCl augmentant graduellement de N à 4 N (280–800)
Température	25°C (0–280); 50°C; 50°C
Position de sortie de quelques acides aminés	Sérine; Thréonine; Valine; Leucine; Lysine; Arginine; Phénylalanine

TABLEAU 6

Repérage, identification et dosage des substances séparées par chromatographie sur papier

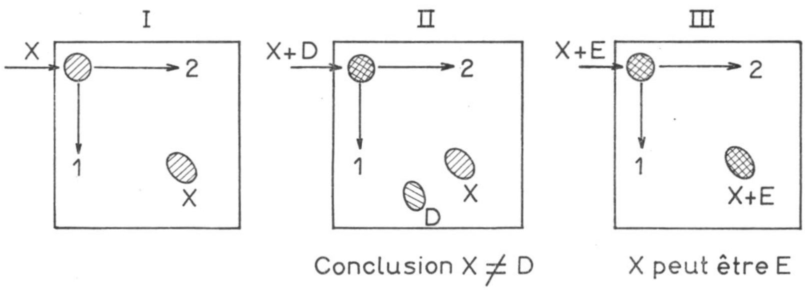
1° *Repérage.*

Substance

Propriétés	Colorée dans le visible ou en U.V. ou fluorescente	Radioactive	A grande activité biologique	Ionisée	Ne présentant aucune des propriétés précédentes
Repérage de la position de la substance par	Observation en lumière ordinaire ou en U. V.	Détermination par tube Geiger ou films ou plaque sensible	Détermination de l'activité biologique des diverses zones du chromatogramme	Détermination des variations de constante diélectrique ou de résistance du papier	

Révélation

2° *Identification d'un composé* X *observé sur un chromatogramme.*



3° *Dosage. — Ex. : Détermination des acides aminés par révélation à la ninhydrine*

I. Sans élution des acides aminés à partir du papier
(Réaction acides aminés-ninhydrine sur papier)

	Estimation visuelle de la dimension de la tache	Mesure de la surface de la tache	Mesure densité optique du centre de la tache	Mesure densité optique sur toute la surface de la tache
Appareil de mesure employé	→	Planimètre	Densitomètre	Densitomètre

II. Avec élution

- Réaction acides aminés-ninhydrine sur le papier → Élution de la couleur obtenue recueillie en tubes à essais → Colorimètre
- Elution des acides aminés → Réaction acides aminés-ninhydrine en tubes à essais → Colorimètre

Les plus couramment employées ont été mentionnées dans le tableau 6. Les substances peuvent être colorées dans le visible ou dans l'ultra violet, c'est-à-dire absorber certaines radiations, ou encore fluorescentes, c'est-à-dire émettre un rayonnement visible par exposition à la lumière ultra-violette.

A ce groupe appartiennent les diverses matières colorantes qui ont donné son nom à la chromatographie.

Les substances séparées peuvent être radioactives. Ce sera, par exemple, le cas des premiers produits de la photosynthèse, formés par un organisme chlorphyllien alimenté en gaz carbonique marqué avec du carbone 14.

Elles peuvent avoir une puissante activité biologique comme les hormones, les enzymes ou les antibiotiques.

Enfin, elles peuvent être ionisées : ce sera le cas, en particulier, quand on aura séparé des ions minéraux.

La position de toutes ces substances sur le chromatogramme pourra être déterminée à partir de ces propriétés.

Les substances colorées ou fluorescentes seront repérées grâce à la couleur qu'elles donnent à la zone qu'elles occupent sur le papier.

La position des substances radioactives pourra être déterminée en déplaçant sur le chromatogramme un tube de Geiger convenablement adapté ou en impressionnant, au moyen du chromatogramme, un film ou une plaque sensible.

Pour les substances à grande activité biologique, on déterminera leur position en découpant les chromatogrammes en petites régions et en appliquant pour chaque zone, les tests biologiques convenables.

Les substances ionisées seront repérées grâce à leurs propriétés électriques ; par exemple, en plaçant le papier à chromatographie entre deux plaques de condensateur et en déplaçant ces plaques on peut observer, le condensateur étant placé dans un circuit convenable, les variations de la constante diélectrique du papier provoquées par la présence d'ions. On peut aussi observer les différences de résistance du papier entre les régions où se trouvent les substances ionisées et celles qui n'en renferment pas.

Révélation

Mais à côté de ces groupes de substances, il en existe beaucoup d'autres qui n'ont pas de propriétés directement et facilement repérables.

Le problème se pose alors de faire apparaître, dans les régions qu'elles occupent, une des propriétés énumérées précédemment. L'opération à effectuer s'appelle la ***révélation.***

On peut aussi révéler des substances qui ont des propriétés qui les rendent répérables pour faire apparaître une propriété plus facilement mesurable.

La technique de révélation la plus classique consiste à faire apparaître dans les zones occupées par les substances une coloration différente de celle du fond du papier.

Il existe différents procédés pour cela : deux d'entre eux, employés, l'un pour les acides aminés, l'autre pour les acides organiques seront donnés comme exemple :

Dans le cas des acides aminés, lorsqu'on apporte sur le papier de la ninhydrine, ceux-ci forment avec ce réactif des complexes de teinte bleue ou violette aisément repérables. On observe des taches ou des cercles bleus sur les chromatogrammes.

Pour les acides organiques, du fait qu'ils acidifient les régions qu'ils occupent dans le papier, il suffira d'imprégner le papier avec une solution d'indicateur de pH qui prendra des couleurs différentes suivant qu'il est répandu sur la tache d'acide ou sur le papier sans acide.

On pourrait ainsi multiplier sans difficulté les exemples.

Notion de R_F — Identification des substances isolées.

La position des substances — ou encore des taches, puisque la couleur est, de beaucoup, la propriété la plus utilisée — la position des taches, donc, est observée ; on détermine alors le rapport de la distance parcourue par le centre de la tache à celle parcourue par le front du liquide pendant le développement. Ce rapport, compris entre O pour les substances qui ne migrent pas et 1 dans le cas des matières qui migrent avec le front du solvant, est désigné par le symbole R_F. Le R_F d'une subs-

tance, obtenu dans des conditions bien déterminées, est une propriété caractéristique, au même titre que sa température d'ébullition ou son point de fusion par exemple.

Pour essayer ensuite d'identifier le composé X, (tableau 6) dont on a repéré la position sur le chromatogramme, on apporte, avant le développement, sur la tache initiale contenant le composé X inconnu, un composé D connu, si l'on suppose que X inconnu pourrait être D.

Après développement, et si nécessaire, révélation, on observe si D et X se superposent, forment une même tache, ou bien s'ils forment deux taches distinctes. Si D et X forment deux taches distinctes, on peut conclure que X n'est pas D.

On recommence l'expérience en remplaçant D par E et ainsi de suite. Si E et X se superposent après développement dans un solvant ou un couple de solvants, il ne faut pas en tirer de conclusion trop hâtive. Il faut rechercher si E et X se superposent aussi après développement dans d'autres solvants. S'il y a aussi superposition, on réunit ainsi un faisceau de présomptions mais il ne s'agit pas, à strictement parler, d'une preuve.

b) *Analyse quantitative*

Les substances étant décelées, puis identifiées, il est souvent nécessaire de les doser. On peut employer pour cela la plupart des méthodes de détection, qui peuvent être rendues quantitatives.

On examinera seulement ici le cas où l'on a décelé une substance par observation de sa couleur et on prendra comme exemple le cas des acides aminés.

On a vu plus haut que la plupart des acides aminés révélés grâce à la ninhydrine forment, par une réaction sensiblement quantitative, des composés bleus. La détermination de la quantité du composé bleu formé sur l'emplacement des acides aminés peut se faire par deux voies différentes, (tableau 6).

— Ou bien, on estime la quantité de composé bleu sur le papier où il s'est formé,

— ou bien on détermine la quantité de composé bleu formé, après élution, c'est-à-dire après l'avoir retiré du papier.

Dans le premier cas, se présentent encore plusieurs possibilités. On peut, par exemple, se contenter d'estimer à l'œil la dimension de la tache et l'intensité de sa coloration, par comparaison avec des quantités connues d'acides aminés développées dans les mêmes conditions que la tache à doser. Ces comparaisons visuelles ne sont pas très précises ; on augmente toutefois leur précision en faisant un nombre important de répétitions.

On obtient cependant de meilleurs résultats en substituant, à la simple observation visuelle des taches, la mesure de leur surface au moyen d'un planimètre.

Il est également possible de mesurer l'absorption de la lumière due à la couleur au centre de la tache.

On peut encore — et ceci est nettement plus satisfaisant — déterminer, l'absorption de la lumière pour chaque point de la tache. On emploie pour cela un appareil appelé densitomètre, appareil qui comprend schématiquement une source de lumière, éventuellement un jeu de filtres monochromateurs, une fente et une cellule photoélectrique reliée à un galvanomètre. On déplacera le papier devant la fente et, pour chaque position du papier, on mesurera les déviations du galvanomètre qui sont directement liées aux pourcentages d'absorption de la lumière incidente. On peut ensuite porter sur un graphique les pourcentages d'absorption de lumière en fonction de la position du papier. A chaque position des substances correspond un « pic » sur la courbe et l'aire sous chaque « pic » représente la quantité de matière présente.

Le deuxième groupe de méthodes se subdivise en deux :

— ou bien on réalise la réaction colorée sur le papier, comme dans les cas précédents, et on élue ensuite dans des tubes à essai les produits colorés obtenus.

— ou bien, on élue les acides aminés avant de les révéler et on fait la réaction acides aminés-ninhydrine en tubes à essai.

Dans les deux cas, le dosage se termine par une lecture au colorimètre.

3° ANALYSE DES MÉLANGES PAR CHROMATOGRAPHIE SUR COLONNE

Les techniques d'analyse par chromatographie sur papier sont très variées, mais les méthodes par chromatographie sur colonne ne le sont pas moins. Comme en chromatographie sur papier, les problèmes de repérage, d'identification et de dosage des substances séparées se posent ici encore, mais ils sont résolus de manière parfois un peu différente. Des réactions à la touche sont le plus souvent utilisées pour déterminer dans quelles fractions d'éluat se trouvent les substances isolées. Les substances décelées peuvent ici être caractérisées par le volume de solvant qu'il faut employer pour les éluer, c'est-à-dire pour les faire sortir de la colonne. A partir des fractions d'éluat, des chromatographies sur papier sont réalisées afin d'identifier les substances contenues et de déterminer si elles sortent des colonnes isolées ou en mélange. Enfin, pour les dosages, entre toutes les méthodes d'analyse applicables aux substances isolées, est généralement choisie celle qui allie à la précision la plus grande rapidité d'exécution.

VI. — CONCLUSION

Les techniques chromatographiques sont donc nombreuses. Le technicien doit, en effet, choisir un support et un solvant, et il existe un nombre parfois élevé de combinaisons support-solvant. Par exemple, pour la séparation des acides aminés au moyen d'un seul support, le papier filtre, dès 1955, BLOCK et coll. (1955) recensaient 71 solvants susceptibles d'être utilisés.

Mais, jusqu'à maintenant, on a fait allusion aux seuls solvants liquides alors qu'on peut aussi remplacer le liquide par un gaz et utiliser les différences de répartition des substances entre phase solide et phase gazeuse pour les séparer. On réalise alors des chromatographies en phase gazeuse. On opère dans des colonnes que l'on peut chauffer jusqu'à 400-500°C ce qui rend la méthode applicable à beaucoup de substances qui deviennent volatiles à ces températures.

Il ne faut donc pas s'étonner, lorsqu'on feuillette un traité de chromatographie, de constater que toutes les familles de composés biologiques, hydrocarbures, acides organiques, acides aminés, amines, protéines, phénols, tannins, sucres, alcooloïdes, stéroïdes, etc. peuvent être analysées par chromatographie.

Mais le domaine de la chromatographie dépasse le terrain de la chimie organique ou biologique et s'étend aussi à celui de la chimie minérale. La chromatographie sur colonne d'échangeurs d'ions, par exemple, permet la séparation à l'état pur des terres rares, Lanthane, Cérium, Praséodyme, Néodyme, Samarium Lutétium, etc., qu'aucune méthode chimique classique n'a permis jusqu'ici de séparer de façon satisfaisante. Les métaux de la famille du platine, Palladium, Rhénium, Irridium et Platine peuvent aussi être isolés par chromatographie, de même l'arsenic et l'antimoine, de même le cobalt, le cuivre, le manganèse, le fer et le zinc.

Bref, on peut dire aujourd'hui que se réalise le propos que tenait, il y a plus de vingt ans, Harry WILLSTEADT (1938) :

« Probablement, dans quelques années, il ne sera plus possible de résumer les applications de la chromatographie, tout aussi peu qu'il serait possible aujourd'hui de résumer les applications de procédés tels que la recristallisation ou la distillation sous vide ».

Reçu pour publication en septembre 1961.

SUMMARY

ELEMENTARY CONCEPTS OF CHROMATOGRAPHY : PRINCIPLES AND TECHNIQUES.

The main stages in the history of chromatography are reviewed, and the analogies and differences in the separation of components of mixtures by partition chromatography, adsorption chro-

matography and ion-exchange chromatography are discussed. The main phases of direct analysis by paper- and column — chromatography, as well as the application of these techniques to the qualitative and quantitative analysis of mixtures are described, and the wide range of application of these new techniques is shown on some examples.

ZUSAMMENFASSUNG

ELEMENTARBEGRIFFE IN DER CHROMATOGRAPHIE GRUNDSÄTZ E UND ANWENDUNGSTECHNIK.

Nach Erwähnung der grossen geschichtlichen Etappen der Chromatographie, untersucht der Verfasser gleichzeitig, und zwar um die Verschiedenheiten und hnlichkeiten Aeherauszustellen, die Trennungsmechanismen der Mischungen in ihre Bestandteile, durch Teilungs-Adsorbtions- und Ionenaustauscherchromatographie. Er beleuchtet alsdann die Hautpmodalitäten der verschiedenen Phasen der Sofort-Analyse auf Papier oder auf Säule, dann die Anwendung dieser Technik au die qualitative und quantitative Analyse der Gemenge, und versucht endlich, an Hand einiger Beispiele, das weite Anwendungsfeld dieser jüngsten Technik aufzuzeichnen.

Элементарные сведения о хромотографии. Принципы и техника ее применения.

Ж. ДЕКО (Тулуза).

Прежде всего автор напоминает главнейшие этапы истории хромотографии и, параллелно, чтобы подчеркнуть их аналогии и различия, разсматривает механизм расщепления смесей на их составные части при помощи хромотографии деления, хромотографии поглощения и хромотографии обмена ионов. Затем им перечисляются главные этапы различных фаз немедленных хромотографических анализов при помощи бумаги и по колонке а также применения этой техники при качественных и количественных анализах смесей; и, наконец, с помощью нескольких примеров автор пробует показать все обширное поле применения этих новейших технических приемов.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BLOCK R. J., DURRUM E. L., ZWEIG G., 1955. *A manual of paper chromatography and paper electrophoresis.* Academic Press., New-York.
BOVÉ J., RAVEUX R., 1957. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 376.
CHOVIN P., 1959. *Chromatographie en chimie organique et biologique* (E. Lederer) Vol. 1. Généralités. Applications en chimie organique. Masson et Cie, Paris.
CONSDEN R., GORDON A. H., MARTIN A. J. P., 1944. *Biochem. J.*, **38**, 224.
HIRS C. H. W., MOORE S., STEIN W. H., 1954. *J. Biol. Chem.*, **211**, 941.
JACQUES J., MATHIEU J. P., 1946. *Bull. Soc. Chim. Fr.*, 94.
KUHN R., LEDERER E., 1931. *Naturwissenschaften*, **19**, 306.
MARTIN A. J. P., SYNGE R. L. M., 1941. *Biochem J.*, **35**, 358.
STEIN W. H., 1903. MOORE S., 1948. *J. Biol. Chem.*, **176**, 337.
TSWETT M., 1903. *Trav. Soc. nat. Varsovie.*
WILLIAMS T. L., 1954. *The elements of chromatography.* Blackie and Son, London.
WILLSTEADT H., 1938. *L'analyse chromatographique et ses applications.* Herman et Cie, Paris.

Ann. agron, 1961, **12** (6), 637-638.

CHRONIQUE DES LIVRES

631. 811. 9 4

STILES. W. — TRACE ELEMENTS IN PLANTS. Cambridge, 1961, 249 p., 16 planches en noir.

Troisième édition du livre paru pour la 1re fois en 1944, réédité en 1948. Les nombreuses connaissances acquises dans le monde sur les éléments-traces, au cours de ces dernières années, justifient cette nouvelle édition. L'auteur décrit les méthodes employées dans l'étude de ces questions : purification des matériaux utilisés dans les expériences de culture, techniques de dosage des éléments dans les végétaux, diagnostic des carences minérales. Les carences et les excès en Mn, Zn, B, Cu, Mo, Cl sont successivement étudiés en envisageant les divers facteurs de milieu susceptibles d'influencer l'absorption des éléments-traces. Un chapitre important est consacré à nos connaissances actuelles sur les fonctions des éléments-traces dans les végétaux. Les relations avec la nutrition animale ne font l'objet que d'un court chapitre. L'ouvrage comporte plus de 500 références bibliographiques, anglo-saxonnes pour la plupart.

S. T.

631. 414. 3 : 631. 811

ULRICH. B. — DIE WECHSELBEZIEHUNGEN VON BODEN UND PFLANZE, IN PHYSIKALISCH-CHEMISCHER BETRACHTUNG. (Interactions Sol-Plante au point de vue physico-chimique). Stuttgart, Ferdinand Enke, 1961, 114 p.

Ce travail constitue une mise au point sur le comportement des éléments nutritifs dans le sol. L'auteur examine trois grandeurs :
— le potentiel des éléments nutritifs dans le sol ;
— la réserve disponible pour les plantes ;
— la cinétique ou vitesse de mobilisation et de transformation.

Les processus d'échange ont lieu dans le sol d'après l'équilibre de DONNAN. En apportant des engrais au sol on déclanche des réactions d'échange, mais la détermination du potentiel voulu n'est pas possible actuellement dans les plantes. On ne peut non plus déterminer la quantité d'éléments se décomposant par réaction chimique avec les constituants du sol.

L'auteur passe en revue les théories modernes sur l'adsorption des ions par les plantes dont celle de l' « écluse », celle de LUNDEGARTH liant l'adsorption à la respiration, et celle de l'accumulation d'échange.

Il reste encore beaucoup d'inconnus dans ces domaines et l'exploitant ne possède aucune base chiffrée pour l'emploi des engrais. Les valeurs fournies par les méthodes physiologiques ou de l'analyse des sols au laboratoire demeurent conventionnelles.

P. J.

63(213)

PHILLIPS. J. — THE DEVELOPMENT OF AGRICULTURE AND FORESTRY IN THE TROPICS. PATTERNS, PROBLEMS AND PROMISE. London, Faber & Faber, 1961, 212 p.

L'auteur, qui a participé à de nombreuses missions au titre d'expert agricole auprès de la Banque Internationale pour la Reconstruction et le Développement, précise dès les premières pages de l'ouvrage qu'il n'est pas dans son intention d'écrire un traité d'agriculture tropicale.

Il expose les différents types de productions, de nomadisme, de forêt, de conservation du sol et des eaux et de sociologie et économie rurale ; il définit ensuite quelques-uns des problèmes les plus importants et les plus urgents qui se posent dans les divers cas et dresse l'inventaire des buts à atteindre qui en découlent. Le cadre écologique qui influe sur ces types et ces problèmes est largement développé.

Ce traité constitue, pour les personnes qui n'ont pas de formation agronomique et qui sont appelés à travailler dans les régions tropicales sous-développées, une première approche des conditions dont elles devront tenir compte pour résoudre les problèmes de développement économique. Il n'apportera que peu de renseignements aux spécialistes des régions tropicales, agronomes, ethnologues et autres, chaque problème en lui-même n'étant qu'effleuré et méritant à lui seul un traité spécial. On regrettera que la bibliographie en fin de volume ne mentionne qu'une seule publication française, et aucun ouvrage belge ou néerlandais, alors que les spécialistes de ces pays ont exposé de façon magistrale les problèmes de ces régions.

P. J.

631. 879. 1 : 631. 875

Davies. A. G. — Municipal composting. London, Faber & Faber, 1961, 203 p.

Dans son introduction l'auteur expose le problème qui se pose aux administrateurs des villes qui doivent débarrasser leurs cités des ordures ménagères en transformant cette matière première en un produit utile pour l'agriculture.

L'incinération est considérée comme la solution la plus coûteuse et la moins profitable.

Après avoir exposé les principes de la fabrication des composts, l'auteur examine les solutions apportées au problème du traitement des ordures ménagères, en Europe et dans le monde. Diverses expériences qui mettent en évidence la valeur des composts pour l'agriculteur sont rapportées. Un chapitre est consacré à l'emploi des gadoues. L'examen des facteurs économiques des prix de fabrications et de vente des composts fait l'objet d'un chapitre important.

Cet ouvrage est de nature à intéresser les administrateurs, les industriels et les agriculteurs, car pour la première fois se trouvent réunis en un seul volume des documents jusqu'ici épars dans de nombreuses publications.

P. J.

635. 82 : 631. 518

Atkins F. C. — Mushroom growing to day. London, Faber & Faber, 1961, 186 p.

Cet ouvrage est la quatrième édition revue et corrigée d'un livre paru pour la première fois en 1950. L'auteur est le président d'honneur de la Commission internationale scientifique pour la Culture des Champignons. L'implantation d'une champignonnière, la production des champignons et les méthodes de lutte contre leurs parasites sont examinés. La fabrication du fumier artificiel, la stérilisation par l'électricité et l'ensemencement font état des techniques les plus modernes. De nombreuses photographies et schémas illustrent cet ouvrage.

P. J.

TABLE DES MATIÈRES DE L'ANNÉE 1961

Mémoires originaux

Barbier (G.) et Mme Haas Árpádné. — Contribution à l'étude de l'acide phosphorique de terres calcaires 425
Blanc (D.). — Étude sur la fertilisation de l'Œillet 573
Bouchet (R. J.). — Signification et portée agronomique de l'évapotranspiration potentielle 51
Broeshart (H.) et Redlich (G. C.). — Mise au point concernant l'application de l'analyse foliaire à la culture des tomates 549
Chaussidon (J.). — La spectrophotométrie différentielle 449
Cointepas (J. P.) et Roederer (P.). — Premiers résultats de l'évolution de la salure du sol par irrigation à l'eau salée en Tunisie 121
Collier (D.). — Mise au point sur les processus de l'altération des granites en pays tempéré 273
Damagnez (J.) et de Villele (O.). — Les besoins en eau réels des cultures et les possibilités d'utilisation des réserves d'eau du sol en Tunisie. Influence de la salure 109
Darlot (A.). — Le problème des irrigations de complément, perspectives de développement, incidence sur l'aménagement des eaux, nécessité et objectifs d'une expérimentation 5
Decau (J.). — Notions élémentaires de chromatographie. Principes et techniques d'application 619
Dejou (J.) et Meriaux (S.). — Étude des sols de la Vallée de l'Orain et de la Grozonne (Jura) 489
Gachon (L.) et Collier (D.). — La fertilisation du Pommier dans les sols argilo-calcaires de l'Auvergne. Expériences à la plantation et après plantation 435
Godard (M.). — L'approvisionnement en eau du sol, les facteurs climatiques et la végétation du Maïs dans le Languedoc méditerranéen 127
Granier (J.). — Compte rendu des essais d'irrigation faits à l'École de Valabre en 1959 et 1960, ... 135
Gras (R.). — Relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du Pommier dans la Sarthe 207
Hallaire (M.). — Irrigation et utilisation des réserves naturelles 87
Huguet (Cl.). — Essais d'évaluation des besoins en eau de cultures maraîchères sous climat méditerranéen 99
Jouis (E.) et Lecacheux (M.-Th.). — Les sols et l'agriculture dans les alluvions anciennes et modernes de la région de Lillebonne (vallée de la Basse-Seine). 513
Lefevre (G.). — Comparaison des prélèvements azotés et potassiques d'une culture de Betterave sucrière en année sèche et en année humide 333
Lefevre (G.) et Hiroux (G.). — Résultats comparés de deux années d'expérience de fumure azotée sur Fétuque 365
Lefevre (P.). — Contribution à l'étude de la capacité d'échange et des bases échangeables des sols non calcaires 169

MAZOYER (Rose). — Emploi des résines anioniques en chimie analytique agricole 609
MERIAUX (Suzanne) et PERREY (Cl.). — Observations sur l'irrigation du Dactyle en sol de réserve hydrique moyenne........ 31
DE PARCEVAUX (S.). — Tests physiologiques permettant de contrôler l'alimentation en eau des plantes 75
PERIGAUD (Simone). — Problèmes posés par le drainage et l'irrigation des sols de Brenne 45
PLAISANCE (G.) et VAN DER MAREL (H. W.). — Contribution à l'étude des limons des plateaux de la forêt de Chaux (Jura) 3e partie 249
RADET (E.). — Contribution à l'étude des phosphates naturels dans les sols de craie 473
RIVIERE (H.). — Activité cellulolytique des bactéries aérobies du sol.
I. — Isolement et purification........ 385
II. — Action des facteurs du milieu sur la production de celluloses bactériennes........ 399
ROBELIN (M.). — Éléments sur la rentabilité de l'irrigation........ 65
SIMONNEAU (P.). — Les phénomènes temporaires de salinisation des sols irrigués en Algérie et au Sahara........ 561
STUDER (R.). — Méthode de détermination des réserves hydriques des sols 599
TURC (L.). — Évaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle 13
VERNET (A.) .et CHAUSSAT (R.). — Dynamique radiculaire et alimentation en eau des végétaux........ 15

CHRONIQUE DES LIVRES

STILES. — Trace elements in plants........ 637
ULRICH. — Die Wechselbeziehungen von Boden und Pflanze in physikalisch-chemischer Betrachtung 637
PHILLIPS (S.). — The development of agriculture and forestry in the tropics. Patterns, problems and promise 637
DAVIES (A. G.). — Municipal composting........ 638
ATKINS (F. C.). — Mushroom growing to day 638

TABLE ALPHABÉTIQUE

BARBIER (G.) et HAAS ÁRPÁDNÉ 425
BLANC (D.) 573
BOUCHET (R. J.) 51
BROESHART (H.) et REDLICH (G. C.) 549
CHAUSSIDON (J.) 449
COINTEPAS (J. P.) et ROEDERER (P.) 121
COLLIER (D.) 273
DAMAGNEZ (J.) et DE VILLELE (O) 109
DARLOT (A.) 5
DECAU (J.) 619
DEJOU (J.) et MERIAUX (S.) 489
GACHON (L.) et COLLIER (D.) 435
GODARD (M.) 127
GRANIER (J.) 135
GRAS (R.) 207
HALLAIRE (M.) 87
HUGUET (Cl.) 99
JOUIS (E.) et LECACHEUX (M.-Th.) 513
LEFEVRE (G.) 333
LEFEVRE (G.) et HIROUX (G.) 365
LEFEVRE (P.) 169
MAZOYER (R.) 609
MERIAUX (S.) et PERREY (Cl.) 81
DE PARCEVAUX (S.) 75
PERIGAUD (S.) 145
PLAISANCE (G.) et VAN DER MAREL (H. W.) 249
RADET (E.) 475
RIVIERE (J.) 385-399
ROBELIN (M.) 65
SIMONNEAU (P.) 561
STUDER (R.) 599
TURC (L.) 13
VERNET (A.) et CHAUSSAT (R.) 157

Le Directeur-Gérant : M. L. CAGNAC.

Imprimerie Bussière à Saint-Amand (Cher), France. — 6-4-1962.

Dépôt légal : 2e trimestre 1962. *N° d'impression : 418*